



SKRIPSI – TK141581

**STUDI KELAYAKAN PROSES REGENERASI NaOH
DALAM UNIT *ACID GAS REMOVAL* YANG
MENGUNAKAN *MEMBRANE ELECTROLYSIS***

Oleh:

**Muhammad Romzuddin
NRP. 2312100103**

**Alvian Pratama
NRP. 2312100143**

**Dosen Pembimbing 1:
Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
NIP. 198107132005011001**

**Dosen Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.
NIP. 195108041974121001**

**JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016**



FINAL PROJECT – TK141581

**FEASIBILITY STUDY OF NaOH REGENERATION IN
ACID GAS REMOVAL UNIT USING MEMBRANE
ELECTROLYSIS**

**Proposed by:
Muhammad Romzuddin
NRP. 2312100103**

**Alvian Pratama
NRP. 2312100143**

**Adviser 1:
Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
NIP. 198107132005011001**

**Adviser 2:
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.
NIP. 195108041974121001**

**JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI KELAYAKAN PROSES REGENERASI NAOH DALAM UNIT *ACID GAS REMOVAL* YANG MENGUNAKAN *MEMBRANE ELECTROLYSIS*

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik Kimia pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik
Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Muhammad Romzuddin

2312 100 103

Alvian Pratama

2312 100 143

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.

..... (Pembimbing)

2. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.

..... (Pembimbing)

3. Dr. Ir. Susianto, DEA

..... (Penguji I)

4. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.

..... (Penguji II)

5. Hikmatun Nirmah, S.T., M.Sc., Ph.D.

..... (Penguji III)



**Surabaya
Juli, 2016**

STUDI KELAYAKAN PROSES REGENERASI NaOH DALAM UNIT *ACID GAS REMOVAL* YANG MENGUNAKAN *MEMBRANE ELECTROLYSIS*

Nama : 1. Muhammad Romzuddin
2. Alvian Pratama
NRP : 1. 2312100103
2. 2312100143
Pembimbing : 1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
2. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.

ABSTRAK

Kebutuhan energi dunia semakin meningkat seiring dengan perkembangan peradaban manusia. Karena sumber energi yang terbatas, pada 2020 diprediksikan bahan bakar fosil akan digantikan sumber energi terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang potensial adalah biogas, karena kadar metana yang tinggi. Biogas diproduksi melalui proses fermentasi bahan organik pada lingkungan anaerobik dengan bakteri metanogen. Selanjutnya, biogas harus dimurnikan dari senyawa pengotornya, yaitu CO₂ dan H₂S melalui unit *acid gas removal*. Pemurnian ini akan meningkatkan *higher heating value* biogas sebesar 600 hingga 900 Btu/scf. Pada pemurnian biogas dalam unit *acid gas removal*, larutan NaOH digunakan sebagai absorban *liquid* yang menghasilkan produk samping garam alkali (*brine*) sebagai limbah. Berikut ini adalah hasil dari studi kelayakan secara teknis maupun ekonomis dalam proses regenerasi NaOH dari garam alkali limbah unit *acid gas removal* dengan metode *membrane electrolysis*. Prosedurnya adalah *cell* anoda diisi dengan larutan *brine*, sedangkan *cell* katoda diisi dengan aqua DM (*demineralized*). *Cell* katoda dan anoda dipisahkan oleh membran penukar kation. Tegangan yang digunakan adalah 5, 10, 15, dan 20 V, sedangkan konsentrasi larutan KCl yang digunakan 0,01; 0,05; 0,1; dan 0,3 M. Temperatur feed bervariasi pada 30 dan 50°C. Hasilnya adalah persen recovery natrium meningkat seiring

dengan tegangan, temperatur *feed*, dan menurun pada konsentrasi larutan elektrolit KCl. Hasil terbaik dengan persen recovery natrium terbesar adalah 95%, didapatkan pada kondisi operasi 30°C, tegangan 15 V dan konsentrasi larutan KCl 0,01 M. Pada kondisi elektrolisis tersebut, efisiensi energi dapat dihitung sebesar 0,009 M-NaOH/Wh, atau setara dengan Rp4600/kg NaOH.

Kata kunci: Biogas, *Acid Gas Removal*, Regenerasi NaOH, dan *Membrane Electrolysis*.

FEASIBILITY STUDY OF NaOH REGENERATION IN ACID GAS REMOVAL UNIT USING MEMBRANE ELECTROLYSIS

Name : 1. Muhammad Romzuddin
2. Alvian Pratama
NRP : 1. 2312100103
2. 2312100143
Advisor : 1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
2. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.

ABSTRACT

The world's energy demand is increasing with the development of human civilization. Due to limited energy resource, after 2020 fossil fuels thus is predicted will be replaced by renewable resources. Taking an example, one of the potential renewable energy to be considered is biogas, as its high content of methane, which can be produced *via* the fermentation process of the organic compounds under controlled anaerobic environment by utilizing the methanogen bacteria. However prior the further use, this biogas must be purified from its impurities contents, *i.e.* acid gas of CO₂ and H₂S, up to 4% and 16 ppmv, respectively, in the acid gas removal unit. This such of purification efforts, will significantly increase the higher heating value of biogas, approximately from 600 to 900 Btu/scf. During the purification process in this acid gas removal unit, NaOH solution is used as a liquid absorbant to reduce those acid gases content, in which the by-product of alkali salt (brine) was produced as waste. Here we report the feasibility study of the NaOH regeneration process in acid gas removal unit *via* membrane electrolysis technology, in which both the technical and economical aspects are taken account. To be precise in procedure, the anode semi-cell was filled with the brine solution, while the cathode semi-cell was filled with demineralized water, and those electrode were separated by the cation exchange membrane. Furthermore the applied potential

were varied ranging from 5, 10, 15 and to 20 V, while the concentration of KCl electrolyte solutions were varied ranging from 0,01; 0,05; 0,1; and to 0,03 M. This study was conducted under controlled temperatures of 30 and 50°C. Here we found that the % sodium recovery was increased along with the applied potential, temperature, and the decrease in KCl electrolyte concentration. We found that the best results, by means of the highest % sodium recovery, *i.e.* 95%, was achieved under the experimental condition of temperature at 30°C, applied potential at 15 V, and KCl electrolyte concentration at 0,01 M. At such electrolysis condition, the energy efficiency was calculated to be 0,009 M-NaOH/Wh, or was equal to operating cost at \$0.04/kg-NaOH.

Keywords: Biogas, Acid gas removal unit, NaOH regeneration, Membrane electrolysis.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah.....	5
I.3 Tujuan Penelitian	5
I.4 Batasan Masalah	5
I.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA ..	7
II.1 Elektrolisis	7
II.2 <i>Membrane Electrolysis</i>	9
II.3 Prinsip Dasar Pembentukan Biogas dari Bahan Organik	12
II.4 Komposisi Biogas	15
II.5 Karbondioksida (CO ₂).....	16
II.6 Absorber	18
II.7 <i>Acid Gas Removal</i>	23
II.8 Penelitian Terdahulu yang Bersangkutan.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
III.1 Deskripsi Penelitian.....	27
III.2 Bahan dan Peralatan Penelitian	27
III.2.1 Bahan Penelitian.....	27
III.2.2 Peralatan Penelitian	27
III.2.3 Skema Alat Penelitian	29
III.3 Variabel Penelitian	32
III.4. Prosedur Penelitian.....	32

III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Penelitian	32
III.4.2 Tahap <i>Acid Gas Removal</i>	33
III.4.3 Tahap Pelaksanaan Penelitian	33
III.5 Diagram Alir Penelitian.....	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
IV.1 Pengaruh Tegangan terhadap Elektrolisis	37
IV.2 Pengaruh Luas Elektroda terhadap Hasil Elektrolisis	41
IV.3 Pengaruh Temperatur <i>Feed</i> terhadap Hasil Elektrolisis	42
IV.4 Pengaruh Penambahan Elektrolit terhadap Hasil Elektrolisis	44
IV.5 Analisa Ekonomi Regenerasi NaOH	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	51
V.1 Kesimpulan.....	51
V.2 Saran	52
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR PUSTAKA	xvi
APPENDIKS A DATA PENELITIAN	A-1
APPENDIKS B PERHITUNGAN	B-1
APPENDIKS C GAMBAR PENELITIAN	C-1

DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Sifat Fisik Garam Alkali yang Dianalisa	10
Tabel II.2	Kelebihan dan Kekurangan Proses Anaerob	13
Tabel II.3	Komposisi Biogas	16
Tabel II.4	Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbondioksida dalam Proses Industri	17
Tabel II.5	Tabel Penilaian Absorban	22
Tabel II.6	Daftar Peneliti <i>Membrane Electrolisis</i>	23
Tabel A.1	Data Hasil Penelitian Pengaruh Tegangan pada Elektroda 18x8 cm dan Temperatur Feed 30°C ..	A-1
Tabel A.2	Data Hasil Penelitian Pengaruh Tegangan pada Elektroda 10x8 cm	A-2
Tabel A.3	Data Hasil Penelitian Pengaruh Temperatur Feed 50°C	A-3
Tabel A.4	Data Hasil Penelitian Pengaruh Penambahan Larutan Elektrolit KCl	A-4
Tabel A.5	Hasil Perhitungan % <i>Recovery</i> , Molaritas, dan Energi yang Digunakan pada Variabel Temperatur Feed 30°C	A-5
Tabel A.6	Hasil Perhitungan % <i>Recovery</i> , Molaritas, dan Energi yang Digunakan pada Variabel Temperatur Feed 50°C	A-6
Tabel A.7	Hasil Perhitungan % <i>Recovery</i> , Molaritas, dan Energi yang Digunakan pada Variabel Penambahan Larutan KCl	A-7

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Jenis Sel Elektrokimia	8
Gambar II.2	Mekanisme <i>Membrane Electrolysis</i>	9
Gambar II.3	Jenis-Jenis Proses <i>Acid Gas Removal</i>	21
Gambar III.1	Skema Peralatan Penelitian	28
Gambar III.2	Reaktor Biogas 5000 L.....	29
Gambar III.3	Skema Reaktor Biogas 5000 L	30
Gambar III.4	Gambar Unit <i>Acid Gas Removal</i> Tampak Depan (a) dan Tampak Belakang (b).....	30
Gambar III.5	Skema <i>Unit Acid Gas Removal</i>	31
Gambar III.6	Skema Unit Regenerasi (<i>Membrane Electrolysis</i>).....	31
Gambar IV.1	Skema unit <i>acid gas removal</i> dan reaksi absorpsi CO ₂ dengan CO ₂	35
Gambar IV.2	Skema <i>membrane electrolysis</i> dan reaksi <i>overall</i> hingga menjadi produk NaOH	36
Gambar IV.3	Perubahan pH di cell anoda (a) dan cell katoda (b) terhadap waktu pada tegangan tertentu dengan luas elektroda 144 cm ²	39
Gambar IV.4	Hubungan persen <i>recovery</i> natrium (a) dan molaritas NaOH (b) terhadap tegangan tertentu dengan luas elektroda 144 cm ²	40
Gambar IV.5	Hubungan persen <i>recovery</i> natrium dan luas permukaan elektroda tertentu pada Tegangan 20 V dan waktu elektrolisis 180 menit	42
Gambar IV.6	Hubungan persen <i>recovery</i> natrium (a) dan molaritas NaOH (b) terhadap temperatur <i>feed</i> pada tegangan 20 V dengan waktu elektrolisis 180 menit	43
Gambar IV.7	Hubungan persen <i>recovery</i> natrium (a) dan molaritas NaOH (b) terhadap waktu pada 15 V dengan penambahan KCl.....	45
Gambar IV.8	Hubungan antara produksi NaOH per energi	

	terhadap waktu elektrolisis pada variabel temperatur <i>feed</i> 30°C	47
Gambar IV.9	Hubungan antara produksi NaOH per energi terhadap waktu elektrolisis pada variabel temperatur <i>feed</i> 50°C	48
Gambar IV.10	Hubungan antara produksi NaOH per energi terhadap waktu elektrolisis pada variabel penambahan larutan KCl	49
Gambar B.1	Hubungan arus terhadap waktu elektrolisis dengan penambahan KCl 0,01 M	B-4
Gambar C.1	<i>Membrane Cell</i>	C-1
Gambar C.2	<i>Power supplier</i>	C-1
Gambar C.3	<i>Membrane Cell</i> Katoda.....	C-1
Gambar C.4	<i>Membrane Cell</i> Anoda.....	C-1
Gambar C.5	pH meter	C-2
Gambar C.6	Elektroda Stainless Steel 316.....	C-2
Gambar C.7	Pompa Feed Elektrolisis	C-2
Gambar C.8	<i>Random Raschig Ring</i> untuk <i>Packed Column</i> Absorber	C-2

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
BM	Berat molekul	gram/mol
M	Molaritas	mol/liter
n	Banyaknya atom atau senyawa	mol
m	Massa	gram
D	Diameter	meter
L	Panjang	meter
V	Volume	liter
ρ	Densitas	gram/liter
T	Temperatur	°C
pH	Derajat keasaman	-
pOH	Derajat kebasaan	-
P	Tekanan	atm
I	Arus	Ampere
i	Current density	Ampere/m ²
V	Tegangan	volt
A	Luas	m ²
N	Molar <i>transport rate</i>	mol/detik
F	Faraday <i>constant</i>	C/M
U	Laju alir	liter/menit
C	Konsentrasi	gram/liter
ε	Konstanta efesiensi arus	-
W	Energi	kWh
N	Normalitas	N
t	Waktu	menit

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Energi merupakan kebutuhan manusia yang paling dasar. Energi dimanfaatkan dalam berbagai bidang untuk menunjang berbagai aktivitas dalam kehidupan sehari-hari. Dan seiring dengan semakin berkembangnya ekonomi dunia, maka kebutuhan energi sebagai bahan bakar untuk industri, transportasi maupun sektor lain akan terus meningkat. Sumber energi yang paling banyak dimanfaatkan dalam pemenuhan kebutuhan masyarakat Indonesia adalah minyak bumi dan batubara (NEC, 2015). Karena sumber daya yang terbatas, setelah tahun 2020 bahan bakar fosil akan mulai diganti dengan sumber daya terbarukan (Oniszk-Popławska, 2014). Indonesia sebagai negara tropis memiliki sumber energi terbarukan yang melimpah sebagai energi alternatif pengganti energi fosil. Salah satu energi terbarukan alternatif tersebut adalah energi biogas.

Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan organik oleh suatu bakteri secara anaerob. Sumber energi dari biogas ini ada beberapa macam antara lain dari kotoran ternak, jerami padi, enceng gondok, limbah industri tahu, bungkil jarak pagar, limbah kelapa sawit, sampah organik dan berbagai sumber alami yang lain (Wahyuni, 2013). Biogas yang berasal dari limbah, residu, dan tanaman akan berperan penting di masa yang akan datang. Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil dalam produksi listrik dan panas atau bahan bakar gas untuk kendaraan bermotor. Biogas yang kaya metana (*Biomethane*) juga dapat menggantikan gas alam sebagai bahan baku untuk memproduksi bahan-bahan kimia (Weiland, 2009).

Produksi biogas secara anaerobik memiliki kelebihan dari bioenergi lain. Biogas adalah salah satu produksi bioenergi yang paling efisien dan berdampak positif bagi lingkungan (Fehrenbach, 2008). Penggunaan biogas diharapkan dapat

mengurangi emisi gas rumah kaca terutama karbon dioksida (CO_2) dibandingkan bahan bakar fosil. CO_2 menyumbang lebih dari 60% pemanasan global karena jumlah emisi yang besar (Albo, 2010). *Digestate* biogas adalah pupuk yang kaya nutrisi untuk tanaman dan dapat menggantikan pupuk kimia. Chau (1998) mengatakan bahwa *digestate* menghasilkan produk tanaman yang lebih banyak dari pupuk organik biasa.

Besarnya kandungan metana (CH_4) menurut Al Seadi (2008) sebesar 50-70% dari total volume biogas, hal berpotensi untuk digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Dalam aplikasi biogas menjadi bahan bakar pembangkit listrik, biogas perlu diolah terlebih dahulu agar dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Hal ini dapat dilakukan dengan menghilangkan gas pengotor pada biogas, seperti CO_2 yang memiliki komposisi cukup besar (Tippayawong, 2009). Boyce (2002) mengatakan bahwa gas dengan komposisi CH_4 tinggi memiliki *heating value* yang lebih tinggi dibandingkan dengan CH_4 dengan komposisi yang rendah. Dalam penelitiannya, telah disimpulkan bahwa terjadi penurunan efisiensi *overall* dari *gas engine* dengan menggunakan biogas jika dibandingkan dengan gas alam. Coskun (2011) telah meneliti perbandingan kadar biogas yang dihilangkan kadar CO_2 , H_2S , dan H_2O dengan biogas yang tidak dihilangkan kadar tersebut terhadap efisiensi *overall* pembangkit listrik. Dalam penelitian tersebut telah disimpulkan bahwa efisiensi *overall* pembangkit listrik dari biogas yang telah dihilangkan pengotornya lebih tinggi dibandingkan dengan biogas yang tidak dihilangkan kadar pengotornya.

Selain itu keberadaan gas CO_2 dalam dunia industri, seperti industri pengolahan minyak, gas alam dan industri petrokimia sangat tidak diharapkan, karena gas CO_2 dikategorikan sebagai *acid gas* (gas asam) yang bersifat korosif sehingga bisa merusak perpipaan dan sistem utilitas pabrik (Kermani, 2003). Pada *Liquefied Natural Gas* (LNG), gas CO_2 harus dihilangkan karena dapat membeku pada suhu rendah yang mengakibatkan penyumbatan pada sistem perpipaan dan *tubing*

pada *heat exchanger* (Kinigoma, 2013). Pada industri amoniak, CO_2 merupakan racun pada katalis sintesa amoniak, oleh karena itu CO_2 harus dipisahkan sebelum memasuki unit sintesa amoniak (Liu, 2013)

Dari kerugian besar yang telah dijabarkan di atas, maka penting dilakukan proses pemisahan CO_2 dari aliran gas. Sun (2015) menyebutkan bahwa teknik *acid gas removal* yang paling ekonomis adalah *chemical absorption*. *Chemical absorption* menggunakan *absorbent amine* seperti *mono-ethanol-amine* (MEA) banyak digunakan dalam industri kimia. Tetapi, MEA memiliki tingkat volatilitas yang tinggi, sangat korosif dan membutuhkan banyak energi untuk regenerasinya (Nguyen, 2011; Wang, 2010; Zhao, 2011). *Absorbent* bisa dikatakan baik bila dapat diregenerasi dan tidak menimbulkan pencemaran lingkungan (Maile, 2015).

Pada penelitian sebelumnya dengan judul “Pengaruh Proses *Acid Gas Removal* Dan Dehidrasi Biogas Terhadap Efisiensi *Overall* Mesin Konversi Biogas - Listrik” telah membandingkan absorbant NaOH , K_2CO_3 , DEA, KOH , CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan Na_2CO_3 secara teknis maupun ekonomis dengan hasil berikut :

Rahayaan (2015) membandingkan kinerja NaOH , K_2CO_3 , DEA, KOH , CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan Na_2CO_3 sebagai absorbant CO_2 . Setelah ditinjau dari beberapa parameter seperti %*Recovery*, ΔpH , *Max Power*, dan *Unit Operation Cost* serta dilakukan penilaian berdasarkan bobot masing-masing, Didapatkan hasil bahwa NaOH mendapatkan nilai tertinggi dibanding absorbant lainnya. Hal ini menjadikan NaOH sangat menjanjikan secara teknis maupun ekonomis dalam absorpsi CO_2 .

Bila dibandingkan dengan MEA, Kapasitas absorpsi CO_2 larutan NaOH lebih tinggi daripada MEA. Selain itu, NaOH juga lebih murah dan melimpah (Yoo, 2012). Tetapi, proses regenerasinya menurut Makhmoudkani (2009) membutuhkan energi yang besar hingga temperatur 900°C sehingga jelas sangat tidak ekonomis, hal ini ditunjang oleh penelitian Boaciocchi

(2012) yang menyimpulkan bahwa regenerasi yang dilakukan ini sangat tidak ekonomis. Produk dari absorpsi CO_2 menggunakan larutan NaOH adalah larutan Na_2CO_3 dan NaHCO_3 yang sulit diregenerasi (Yoo, 2012). Saat ini memang dalam industri kimia asam dan basa banyak digunakan sebagai perantara untuk berbagai macam produk. Asam dan basa ini kemudian dikonversi menjadi garam dan harus ditangani sebagai limbah (Faverjon, 2006).

Oleh karenanya, hal tersebut memotivasi kami untuk mengembangkan suatu teknologi yang memungkinkan untuk meregenerasi limbah garam alkali yang dihasilkan dalam proses *acid gas removal* menggunakan absorban NaOH dengan teknologi yang lebih ekonomis dengan hasil kemurnian produk NaOH yang tinggi.

Membrane electrolysis adalah teknologi yang sangat layak untuk produksi NaOH yang merupakan bahan baku penting dalam banyak industri. Saat ini, lebih dari 90% dari kapasitas produksi NaOH menggunakan *membrane electrolysis* (Savari, 2008). Reaksi elektrokimia dan membran dapat digunakan untuk mengubah garam menjadi asam dan basa penyusunnya (Faverjon, 2006). Sehingga dapat digunakan dalam metode regenerasi NaOH dalam proses *acid gas removal*, hal ini ditunjang dengan penelitian Simon (2014) yang menyimpulkan larutan *brine* yang terdiri dari NaCl, Na_2CO_3 , dan NaHCO_3 dapat diregenerasi menjadi NaOH menggunakan *membrane electrolysis*, namun pada percobaan yang dilakukan oleh Simon (2014), masih menggunakan *current density* yang tinggi, sehingga membutuhkan arus yang besar dalam proses regenerasi. Oleh karena itu, perlu dilakukan inovasi agar proses elektrolisis lebih efisien dengan penambahan larutan elektrolit ke dalam larutan garam alkali.

I.2 Rumusan Masalah

Penelitian yang menggunakan metode absorpsi CO₂ menggunakan larutan NaOH menghasilkan produk garam alkali (*brine*). Hal ini memotivasi penulis untuk mengembangkan metode proses regenerasi NaOH agar dapat dimanfaatkan kembali untuk proses absorpsi.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan studi kelayakan secara teknis maupun ekonomis proses regenerasi NaOH dari limbah absorpsi unit *acid gas removal* dengan metode *membrane electrolysis*, dengan mengamati pengaruh tegangan, luas permukaan elektroda, temperatur *feed* dan penambahan elektrolit terhadap hasil elektrolisis.

I.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan, diantaranya sebagai berikut :

- a) Proses pembentukan biogas menggunakan reaktor anaerobik 5000 L dengan *feed* molasses.
- b) Proses *acid gas removal* menggunakan *packed bed column* dengan *raschig ring* dan aliran *counter current*.
- c) Regenerasi garam alkali (*brine*) menggunakan metode *membrane electrolysis*.

I.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan referensi metode regenerasi limbah unit *acid gas removal* yang menggunakan larutan NaOH yang ekonomis dan ramah lingkungan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

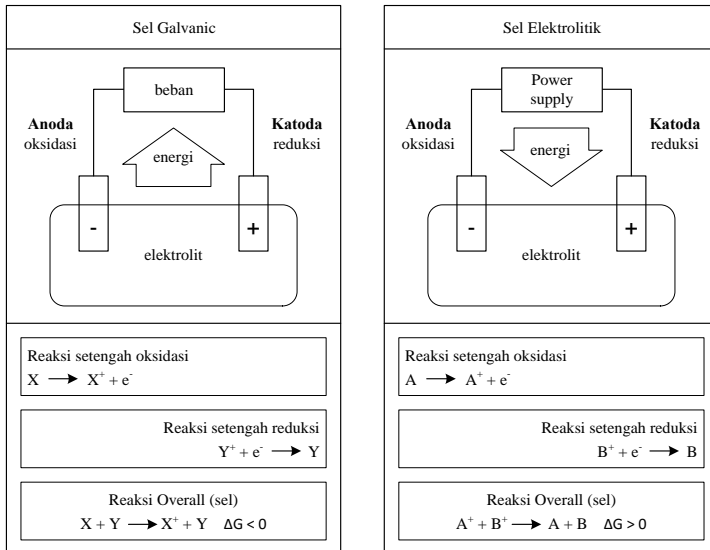
II.1 Elektrolisis

Elektrokimia adalah ilmu yang mempelajari akibat transfer muatan listrik dari satu fasa ke fasa lain. Elektrokimia juga bisa diartikan sebagai studi tentang hubungan antara perubahan kimia dan kerja listrik. Elektrokimia dipelajari melalui penggunaan sel elektrokimia yang merupakan sistem dengan memasukkan reaksi redoks untuk menghasilkan atau menggunakan energi listrik.

Teknik elektrokimia mulai diterapkan dalam berbagai hal semenjak tahun 1807, dimana saat itu Sir Humphry Davy berhasil memisahkan logam kalium dari senyawanya. Prinsip pen era pan ini berkaitan dengan sel elektrokimia. Secara umum sel elektrokimia dibagi menjadi sel galvani dan sel elektrolisis. Proses yang terjadi pada sel galvani ialah reaksi kimia berubah menjadi energi listrik, sedangkan di dalam sel elektrolisis energi listrik menjadi reaksi kimia. Pada sel galvani elektrode positif sebagai katode, dan elektrode negatif sebagai anode, sedangksn pada sel elektrolisis elektrode negatif sebagai katode, dan elektrode positif sebagai anode. Penggunaan sel elektrolisis untuk pengolahan limbah telah dimulai tahun 1950, namun penggunaannya secara profesional baru dimulai semenjak beberapa tahun terakhir ini, terutama setelah ditemukannya beberapa bahan elektrode, bahan membran serta inovasi-inovasi metode teknik kimia (Ryan, 1982). Sel Galvani bekerja dengan melepaskan energi bebas dari reaksi spontan untuk menghasilkan listrik, sedangkan sel elektrolisis bekerja dengan menyerap energi bebas dari sumber listrik untuk menggerakkan reaksi tak spontan Sebagai contoh saat ini semakin banyak ditemukan bahan elektrode yang mempunyai stabilitas

kimia maupun fisika yang sangat tinggi, konduktivitas listrik yang tinggi, *non fouling*, elektroda potensial tinggi dan mempunyai tegangan lebih yang rendah, yang kesemuanya merupakan sifat-sifat yang baik terhadap efisiensi reaksi elektrolisisnya (Bray, 1986).

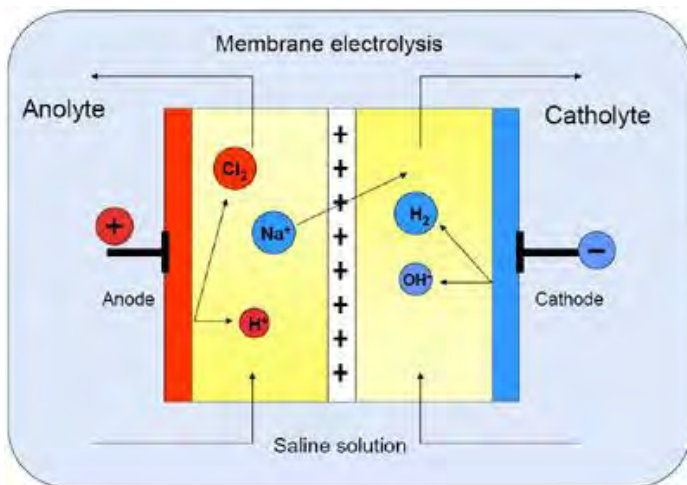
Pada sel elektrolisis zat-zat dapat terurai sehingga terjadi perubahan massa. Peruraian tersebut disebabkan oleh energi listrik yang diangkut oleh ion-ion yang bergerak di dalam larutan elektrolit, atau karena adanya daya gerak listrik di dalam sel tersebut. Daya gerak listrik ini merupakan perbedaan potensial standar elektroda negatif (katode) dan potensial standar elektroda positif (anode). Perbedaan potensial standar ini biasanya disebabkan perbedaan bahan yang dipakai antara anode dan katode, namun bisa juga bahan yang dipakai sama, tetapi konsentrasi larutan elektrolitnya berbeda. Jenis yang terakhir ini disebut sel konsentrasi.



Gambar II.1 Jenis Sel Elektrokimia

II.2 *Membrane Electrolysis*

Elektrolisis membran adalah proses dimana terjadi reaksi di kedua elektroda, yaitu reduksi katodik serta oksidasi anodik, yang terkait dengan transportasi dan transfer ion bermuatan. Dalam elektrolisis membran, reaksi elektroda sangat penting untuk proses pemisahan yang sebenarnya. Tujuan dari membran dalam elektrolisis ini adalah untuk memisahkan *loop* anoda (analit) dari *loop* katoda (katolit) oleh cairan, serta untuk menghindari reaksi sekunder yang tidak diinginkan, sehingga untuk menggabungkan reaksi elektroda dengan langkah pemisahan atau untuk mengisolasi secara terpisah produk terbentuk pada elektroda. Dalam elektrolisis air, produk dari proses ini dapat dalam bentuk gas seperti oksigen dan hidrogen serta asam (H^+) dan basa (OH^-) terbentuk pada elektroda atau kombinasi gas klorin dan larutan soda kaustik serta hidrogen seperti dalam natrium klorida elektrolisis.



Gambar II.2 Mekanisme *Membrane Electrolysis*

Reaksi elektrokimia yang sering diamati adalah pengendapan logam dan pembentukan hidrogen pada katoda serta oksidasi senyawa organik, ion klorida, sianida, nitrit, dan lainnya pada anoda. Reaksi oksidatif dan reduktif dalam elektrokimia diminati dalam industri, karena biaya operasi yang murah dan tidak memerlukan kondisi tekanan dan temperatur tertentu. Elektrolisis natrium klorida untuk memproduksi klorin dan kaustik soda adalah proses elektrolisis membran yang penting di dunia. Saat ini, sekitar 48 juta ton klorin diproduksi setiap tahun, dengan lebih dari 30% dari jumlah ini yang dikonversi oleh elektrolisis membran. Selain itu, elektrolisis membran digunakan untuk memproduksi natrium hipoklorit sebagai desinfektan. Belakangan ini, elektrolisis digunakan untuk memproduksi ozon, klorin dioksida, dan asam hipoklorit dalam pengolahan air minum (Zoulias, 2002).

Garam alkali yang tidak diinginkan pada hasil pengolahan *Coal Seam Gas* (CSG) adalah NaCl, NaHCO₃ dan Na₂CO₃. NaHCO₃ dan Na₂CO₃ adalah garam yang paling tidak diinginkan pada CSG (Nghiem, 2011). Konsentrasi Na⁺, HCO₃⁻, dan Cl⁻ dalam larutan brine adalah 17.0, 19.7, dan 2.2 g/L.

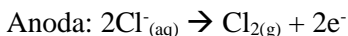
Tabel II.1. Sifat Fisik Garam Alkali yang Dianalisa

Salt	Molecular weight (g/mol)	Solubility at 25 °C (g/L)	Conductivity of 10% (wt/wt) brine at 25 °C (mS/cm)
NaCl	58.44	362	130
NaHCO ₃	84	105	55
Na ₂ CO ₃	106	307	79

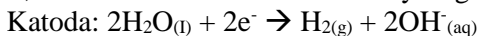
(Sumber : Simon, 2014)

Dalam proses elektrolisis *chloro-alkali* membran saat ini, air garam dimasukkan ke anoda, yang menghasilkan larutan NaOH, klorin dan gas hidrogen.

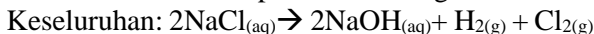
Dengan demikian, reaksi berikut terjadi di anoda dan katoda :



Di katoda, air dielektrolisa ke OH^{-} dan hydrogen gas.



Sebuah membran penukar kation memisahkan anoda dan katoda solusi, tetapi permeabel untuk Na^{+} . Dengan demikian, Na^{+} dapat bermigrasi melintasi membran untuk menggabungkan dengan OH^{-} di katoda untuk membentuk NaOH . Reaksi elektrolisis keseluruhan NaCl untuk NaOH dan Cl_2 dapat ditulis sebagai:



Natrium bikarbonat (NaHCO_3), natrium karbonat (Na_2CO_3), dan natrium klorida (NaCl) adalah tiga mineral yang paling melimpah di CSG. Selama membran elektrolisis, ion natrium (Na^{+}) dari sel anoda menembus melalui membran pertukaran kation menuju katoda. Produksi sel katoda ion hidroksida (OH^{-}), yang digabungkan dengan Na^{+} untuk membentuk sodium hidroksida (NaOH). Berbeda dengan proses chlor-alkali, yang menggunakan NaCl sebagai sumber natrium, ketika air garam mengandung NaHCO_3 atau Na_2CO_3 , CO_2 dan O_2 yang dihasilkan pada anoda. Reaksi kimia keseluruhan yang mewakili elektrolisis NaHCO_3 dan Na_2CO_3 dapat ditulis sebagai berikut:



Tingkat transportasi Na^{+} ion melalui membran penukar kation mengikuti hukum dan meningkat Faraday proporsional dengan arus diterapkan:

$$N(\text{mol/s}) = \frac{1}{F} \quad (2.1)$$

Dimana N adalah tingkat transportasi molar kation melalui membran, I adalah arus yang ditetapkan (A) dan F adalah konstanta Faraday (96.485 C/M). Ketika laju aliran larutan air garam (U_{brine}), Volume ruang anoda (V_{anode}) dan

efisiensi arus (ϵ) dari proses elektrolisis diperkenalkan, Persamaan (2.1) dapat disusun kembali untuk mengekspresikan transportasi molar keseluruhan natrium kation melalui Membran (N_{overall}) selama proses:

$$N_{\text{overall}} (\text{mol}) = \frac{I \times \frac{V_{\text{anode}}}{U_{\text{brine}}}}{F} \times \epsilon \quad (2.2)$$

Dengan koefisien efisiensi (ϵ) :

$$\epsilon = \frac{U_{\text{brine}} \times F \times (C_{\text{in}} - C_{\text{out}})}{I_{\text{dens}} \times A} \quad (2.3)$$

Dimana A adalah luas permukaan membran, I_{dens} adalah kepadatan arus diterapkan (A/m^2), dan C_{in} dan C_{out} adalah *equivalent* kation (Na^+) konsentrasi pada masing-masing inlet dan outlet dari sel anoda. Persamaan (2.2) dan (2.3) merupakan model sederhana untuk mensimulasikan produksi NaOH pada kondisi operasi yang berbeda (misalnya berbagai kepadatan arus dan laju aliran garam alkali) (Simon, 2004).

II.3 Prinsip Dasar Pembentukan Biogas dari Bahan Organik

Pengolahan limbah secara biologis dibedakan menjadi dua proses yaitu proses aerobik dan proses anaerobik, pada proses aerobik berlangsungnya proses sangat tergantung dari adanya oksigen, sedangkan dalam proses anaerobik justru sebaliknya karena oksigen menghambat jalannya proses. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.

- Proses aerobik
 $\text{Bahan organik} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + MO$
- Proses anaerobik
 $\text{Bahan organik} \longrightarrow CO_2 + CH_4$

Kelebihan utama yang dimiliki pada proses anaerobik, yaitu:

1. Dihasilkan biogas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

2. Tidak diperlukan energi untuk aerasi.
Kelebihan dan kekurangan proses anaerob dapat dilihat pada **Tabel II.2**:

Tabel II.2 Kelebihan dan Kekurangan Proses Anaerob

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Derajat stabilitas tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rate</i> pertumbuhan bakteri methanogenesis rendah
<ul style="list-style-type: none"> • Produk <i>sludge</i> buangan rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Bakteri methanogenesis sangat <i>sensitive</i> terhadap perubahan temperatur
<ul style="list-style-type: none"> • Kebutuhan <i>nutrient</i> rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Pada temperatur operasi <i>thermophilic</i> dibutuhkan energi untuk pemanasan
<ul style="list-style-type: none"> • Dihasilkan gas metana sebagai sumber energi 	
<ul style="list-style-type: none"> • Tidak dibutuhkan energi untuk aerasi 	

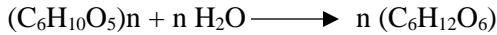
(Sumber: Seghezzo, 2004)

Penguraian bahan – bahan organik menjadi biogas melalui 4 tahapan proses, yaitu:

1. Tahap Hidrolisa

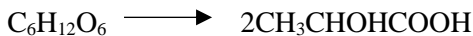
Dalam proses ini organisme fermentasi hidrolitik menghidrolisis dan fermentasi bahan organik kompleks seperti protein, poli karbonat, lipid, senyawa organik sederhana (format, asetat, asam lemak propionat, butirat dan lainnya, etanol, dll), hydrogen dan karbon dioksida. Proses ditunjukkan oleh fermentasi glukosa oleh bakteri fermentasi selama 48 jam. Kelompok bakteri pada tahap hidrolisa ini adalah *Streptococci*, *Bacteriodes*, dan beberapa

jenis *Enterobacteriaceae*. Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah:

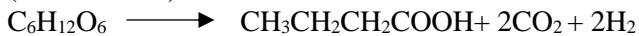


2. Tahap Asidifikasi

Produk utama fermentasi adalah asetat, hidrogen, karbondioksida, propionat, dan butirat. Propionat dan butirat di fermentasi lebih lanjut menjadi hidrogen, karbondioksida dan asetat yang merupakan pembentukan metana (methanogenesis). pH optimum bagi bakteri asidogenesis adalah 5,2 – 6,5 dengan laju pertumbuhan spesifik 2 hari (Solera, 2002). Kelompok bakteri asidifikasi, seperti bakteri asidogen dan *Desulfovibrio*. Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah:



(Asam Laktat)



(Asam Butirat)



(Asam Propionat)

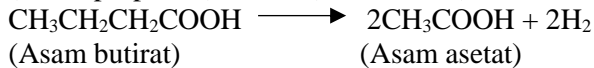
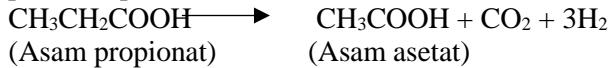


(Asam Asetat)

3. Tahap Asetogenasi

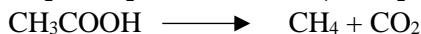
Produk dari tahap asidifikasi yang tidak langsung dikonversi menjadi metana oleh bakteri methanogenik akan dikonversi menjadi senyawa methanogenik selama proses asetogenesis. Produk yang terbentuk selama asetogenesis disebabkan oleh sejumlah mikroba yang berbeda misalnya *Syntrophobacter wolnii* dekomposer propionat dan *Wolfei syntrophomonos* dekomposer butirat dan pembentuk asam lainnya adalah *Clostridium spp*, *Peptococcus anerobus*, *Lactobacillus*, dan *Actinomyces*. Tahap asetogenasi ini juga termasuk pada produksi asetat dari hidrogen dan karbon

dioksida oleh asetogen dan homoasetogen. Kadang-kadang tahap asidifikasi dan asetogenasi dikombinasikan sebagai satu tahapan saja. Reaksi pada tahap ini adalah:



4. Tahap Methanogenasi

Proses pada tahap methanogenasi dilaksanakan oleh mikroorganisme kelompok metanogen, yang terbagi dalam dua kelompok, kelompok pertama adalah bakteri yang mengkonversi asam asetat menjadi karbon dioksida dan metana oleh mikroorganisme asetropik, sedangkan kelompok kedua adalah *hydrogen-utilizing* methanogenesis menggunakan hidrogen sebagai elektron dan karbondioksida sebagai elektron aseptor untuk menghasilkan dua kali lipat. pH optimum yang diperlukan 6–7 (Solera, 2002). Bakteri yang berperan dalam tahap ini adalah Reaksi yang terjadi pada proses ini adalah:



II.4 Komposisi Biogas

Biogas mempunyai komposisi antara lain metana, karbon dioksida, uap air, oksigen, nitrogen, amoniak, hydrogen dan hidrogen sulfide. Letak potensi biogas adalah pada kandungan metana yang besar didalamnya. Komposisi secara lengkap biogas sendiri dapat dilihat pada **Tabel II.3.**

Tabel II.3 Komposisi Biogas

Komponen	Rumus Kimia	Kadar (% Volume)
Metana	CH ₄	50-75
Karbon dioksida	CO ₂	25-45
Uap air	H ₂ O	2-7
Oksigen	O ₂	<2
Nitrogen	N ₂	<2
Amoniak	NH ₃	<1
Hidrogen	H ₂	<1
Hidrogen sulfida	H ₂ S	<1

(Sumber: Seadi, 2008)

II.5 Karbondioksida (CO₂)

Karbondioksida adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Berbentuk gas pada temperatur dan tekanan standar dan berada di atmosfer. Karbondioksida termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5,1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78°C. Dalam bentuk padat, karbondioksida disebut *dry ice*. Larutan karbondioksida mengubah warna lakmus dari biru menjadi merah muda.

Gas karbondioksida diproduksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam dan biomassa. Keberadaan karbondioksida pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada pipa gas alam, kandungan karbondioksida yang diizinkan sekitar 1-2% mol.

Adanya karbondioksida yang berlebihan dapat melubangi lapisan ozon, menyebabkan efek rumah kaca,

dan pemanasan global. Salah satu indikator yang digunakan dalam menganalisa isu pemanasan global adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas karbondioksida. Gas karbondioksida yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas karbondioksida, seperti pada **Tabel II.4**:

Tabel II.4 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbondioksida dalam Proses Industri

Proses	Batas konsentrasi gas karbondioksida
Industri manufaktur	< 0,1% CO ₂
Industri amoniak	< 16 ppm CO ₂
Pemurnian gas alam :	
• Pipa gas	< 4% CO ₂
• Bahan baku LNG	< 50 ppm CO ₂
Sintesa gas untuk produksi kimia (H ₂ /CO)	< 500 ppm CO ₂
Gasifikasi batu bara	~500 ppm CO ₂
Industri etilen	~1 ppm CO ₂
Pembangkit tenaga listrik :	
• Pembangkit tenaga listrik IGCC	<0,5% CO ₂
• Pembangkit listrik batubara	<1,5% CO ₂

(Sumber: GPSA 11th)

Selain memiliki beberapa efek negatifkarbondioksida juga memiliki nilai ekonomis, diantaranya karbondioksida digunakan dalam industri minuman berkarbonasi, *dry ice*, bahan baku pada industri urea, dan industri abu soda.

II.6 *Absorber*

Alat yang digunakan dalam proses absorpsi disebut *absorber*. *Absorber* berfungsi untuk memisahkan suatu komponen atau lebih dari campurannya menggunakan prinsip perbedaan kelarutan. Karena perbedaan kelarutan inilah, transfer masa *absorber* digunakan untuk memisahkan suatu *solute* dari arus gas. *Solute* adalah komponen yang dipisahkan dari campurannya sedangkan pelarut (*solvent* sebagai *separating agent*) adalah cairan atau gas yang melarutkan *solute*. Kinerja *absorber* juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Tekanan
2. Laju alir gas
3. Konsentrasi larutan penyerap

Absorban merupakan cairan yang dapat melarutkan bahan yang akan diabsorpsi. Adapun persyaratan absorban antara lain:

a) Kelarutan Gas

Kelarutan gas harus tinggi sehingga dapat meningkatkan laju absorpsi dan menurunkan kuantitas pelarut yang diperlukan. Umumnya pelarut yang memiliki sifat yang sama dengan bahan terlarut akan lebih mudah dilarutkan. Jika gas larut dengan baik dalam fraksi mol yang sama pada beberapa jenis pelarut, maka dipilih pelarut yang memiliki berat molekul paling kecil agar didapatkan fraksi mol gas terlarut yang lebih besar. Jika terjadi reaksi kimia dalam operasi absorpsi maka umumnya kelarutan akan sangat besar.

b) Volatilitas

Pelarut harus memiliki tekanan uap yang rendah, karena jika gas yang meninggalkan kolom absorpsi jenuh terhadap pelarut maka akan ada banyak pelarut yang terbuang.

- c) Korosifitas
Pelarut yang korosif dapat menyebabkan kerusakan pada kolom *absorber*.
- d) Harga
Penggunaan pelarut yang mahal dan tidak mudah *direcovery* akan meningkatkan biaya operasi kolom *absorber*.
- e) Ketersediaan
Ketersediaan pelarut akan sangat mempengaruhi stabilitas harga pelarut dan biaya operasi secara keseluruhan.
- f) Viskositas
Viskositas pelarut yang rendah memiliki kelebihan karena akan terjadi laju absorpsi yang tinggi, meningkatkan karakter *flooding* dalam kolom, jatuhkan tekanan yang kecil dan sifat perpindahan panas yang baik.
- g) Lain-lain
Sebaiknya pelarut tidak memiliki sifat racun, mudah terbakar, stabil secara kimiawi dan memiliki titik beku yang rendah.

Pemilihan pelarut umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain:

- Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk.
- Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan pelarut. Misalnya air, dimana merupakan pelarut yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar.

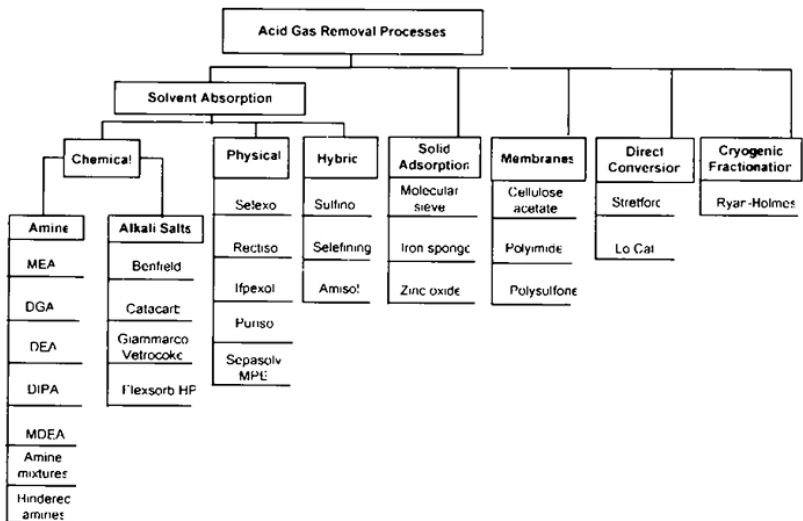
Hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan *absorber* adalah keberadaan bahan isian (*packing*). Bahan

isian (*packing*) dalam *absorber* berfungsi untuk memperluas bidang kontak di dalam *absorber*. Bahan isian (*packing*) yang digunakan dalam *absorber* dapat terbuat dari bermacam-macam bahan. Syarat-syarat suatu bahan isian yang bisa digunakan adalah sebagai berikut (McCabe, 1999):

1. Tidak bereaksi dengan fluida dalam *absorber*.
2. Kuat tetapi tidak berat.
3. Memberikan luas kontak yang besar.
4. Murah.
5. Tahan korosi.

II.7 *Acid Gas Removal*

Pada proses ini gas asam yang dihilangkan adalah CO₂ dan H₂S sebagai produk samping dari reaksi pembentukan biogas. CO₂ bersifat korosif terhadap logam dan menurunkan nilai *calorific* biogas, sedangkan H₂S akan dihilangkan karena bersifat racun serta dapat menyebabkan korosi pada sistem perpipaan, kompressor atau tangki. Ada beberapa metode terkini yang sedang dikembangkan ataupun telah dilakukan pengujian kelayakan dalam skala kecil (*Pilot Project*) dan bahkan telah digunakan untuk menghilangkan kandungan CO₂. Beberapa metode tersebut seperti **Gambar II.3**:



Gambar II.3 Jenis-Jenis Proses *Acid Gas Removal*
(Sumber: Ryckebosch , 2011)

Dari beberapa metode-metode tersebut, dipilih yang merupakan absorban paling baik, yaitu NaOH. Natrium hidroksida (NaOH), juga dikenal sebagai soda kaustik, sodaapi, atau sodium hidroksida, adalah sejenis basa logam kaustik. Natrium Hidroksida terbentuk dari oksida basa natrium oksida dilarutkan dalam air. Natrium hidroksida membentuk larutan alkalin yang kuat ketika dilarutkan ke dalam air. Ia digunakan di berbagai macam bidang industri, seperti absorpsi pada proses pengolahan gas. Natrium hidroksida bersifat lembap cair dan secara spontan menyerap karbon dioksida dari udara bebas. . Setelah ditinjau dari beberapa parameter seperti %*Recovery*, ΔpH , *Max Power*, dan *Unit Operation Cost* serta dilakukan penilaian berdasarkan bobot masing - masing, Didapatkan hasil bahwa NaOH mendapatkan nilai tertinggi dibanding absorban lainnya. Hal ini menjadikan NaOH sangat menjajikan secara teknis maupun ekonomis

dalam pemurnian CO₂ (Rahayaan, 2015). Perbandingan absorban NaOH, K₂CO₃, DEA, KOH, CaCO₃, Ca(OH)₂ dapat dilihat pada **Tabel II.5**.

Tabel II.5. Tabel Penilaian Absorban

Bobot	30%	15%	5%	50%	100%
Absorban	%Recovery	ΔpH	Max Power	Operation Cost	Total
NaOH	16.6	4.1	395.4	119.2	93.1
Nilai	95	83	93	95	
K ₂ CO ₃	6.1	1.2	376.2	47.9	92.2
Nilai	77	100	83	100	
DEA	21.9	1.6	412.3	496.2	91.7
Nilai	100	95	100	85	
KOH	15.8	2.7	391.1	368.8	89.9
Nilai	93	90	90	88	
CaCO ₃	9.3	2.8	398.2	248.1	89.5
Nilai	85	85	95	93	
Ca(OH) ₂	7.1	4.4	386.4	78.6	89.2
Nilai	80	80	85	98	
Na ₂ CO ₃	3.4	2.2	388.3	208.1	85.8
Nilai	75	93	88	90	

(Sumber: Rahayaan, 2015)

II.8 Penelitian Terdahulu yang Bersangkutan

Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang dijaadikan referensi sebagai acuan oleh penulis:

Tabel II.6 Daftar Peneliti *Membrane Electrolisis*

No	Nama Penulis	Judul	Hasil yang Diperoleh
1	Alexander Simon, 2014	<i>Sodium hydroxide production from sodium carbonate and bicarbonate solutions using membrane electrolisis: A feasibility study</i>	Hasil percobaan menggambarkan kelayakan produksi NaOH dari NaCl, NaHCO ₃ dan Na ₂ CO ₃ , sumber utama natrium dalam larutan brine CSG menggunakan <i>membrane electrolisis</i> . Efisiensi arus <i>membrane electrolisis</i> cell tidak berubah secara signifikan ketika digunakan larutan <i>brine</i> yang berbeda (NaCl, NaHCO ₃ dan Na ₂ CO ₃) sebagai <i>feed</i> . Hasilnya mengindikasikan bahwa counter ions (Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻) tidak mempengaruhi transport ion Na ⁺ melalui membrane. Tidak ada variasi produksi NaOH ketika tiga larutan <i>brine</i> yang mengandung 100 g/L tiap garam pada kondisi yang sama.

2	F. Faverjon, 2006	<i>Regeneration of hydrochloric acid and sodium hydroxide from purified sodium chloride by membrane electrolysis using a hydrogen diffusion anode-membrane assembly</i>	Asam klorida dapat diregenerasi dari larutan natrium klorida menggunakan tiga kompartemen sel. Produksi asam hanya terbatas pada kebocoran H^+ melalui membran penukar anion. Efisiensi arus menurun ketika konsentrasi asam meningkat.
4	T. Asawa, 1988	<i>Material properties of cation exchange membranes for chloralkali electrolysis, water electrolysis and fuel cells</i>	Penerapan pertukaran ion membran telah mengakibatkan proses inovatif dalam elektrolisis <i>chlor-alkali</i> , tetapi dalam elektrolisis air dan bahan bakar sel proses ini belum begitu menjanjikan. Namun, pengembangan lebih lanjut dalam membran pertukaran ion diharapkan dapat memberikan kontribusi untuk memecahkan masalah yang berkaitan dengan pasokan energi masa depan.

5	D.Y. Tuarev, 2011	<i>Use of Membrane Electrolysis for Recovery of Heavy Metal Ions</i>	Elektrolisis membran dapat digunakan untuk memulihkan ion kadmium pada konsentrasi rendah pada suatu larutan. Metode elektrolisis membran disarankan untuk daur ulang garam alkali.
---	-------------------	--	---

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya larutan absorban NaOH yang dapat diregenerasi kembali setelah digunakan untuk purifikasi gas CO₂. Proses regenerasi yang digunakan adalah *membrane electrolysis*.

III.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

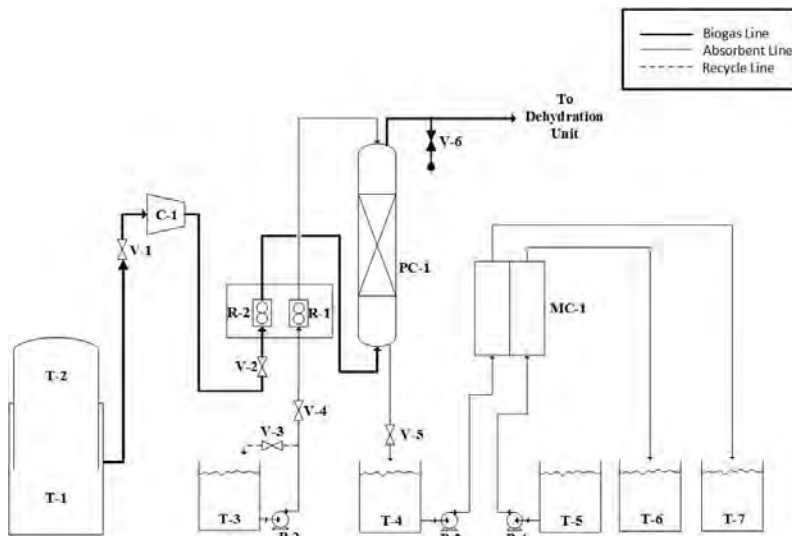
III.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Biogas
2. Natrium hidroksida (NaOH) teknis
3. *Aqua DM (Demineralized)*
4. Kalium klorida (KCl) teknis
5. Natrium Karbonat (Na₂CO₃) teknis

III.2.2 Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan 3 unit utama yaitu unit produksi biogas, unit *acid gas removal* dan unit regenerasi *acid gas removal*. Unit produksi biogas terdiri dari satu buah tangki digester 5000L yang dilengkapi pompa air untuk sirkulasi serta satu buah *gas holder*. Sedangkan untuk unit *acid gas removal* terdiri dari *packed column reactor* untuk *acid gas removal* yang diisi dengan *raschig ring* serta dilengkapi dengan, pompa, pompa biogas, valve, rotameter gas dan liquid, dan tangki larutan absorban. Sedangkan untuk unit regenerasi *acid gas removal* terdiri dari *electrolysis cell* dengan katoda dan anoda tipe *stainless steel type 316*, dan *programmable power supplier*. Secara lengkap dijelaskan pada gambar dibawah ini:



Gambar III.1 Skema Peralatan Penelitian

Keterangan :

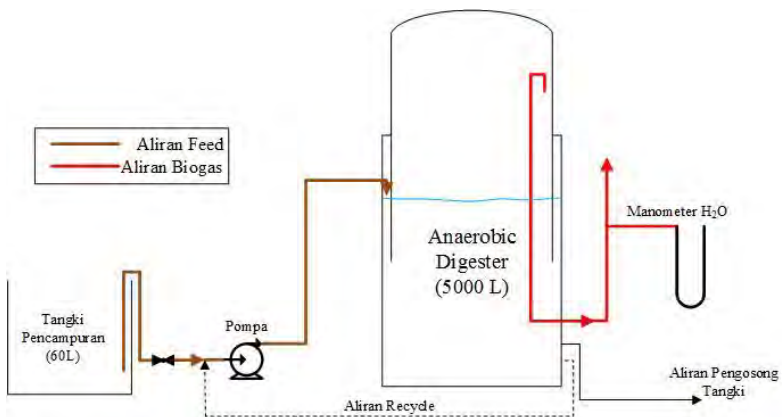
- T-1 = Tangki *digester* (5000L)
- T-2 = Tangki penampung biogas
- T-3 = Tangki penampung larutan absorbant (70 L)
- T-4 = Tangki limbah absorbant (70 L)
- T-5 = Tangki *aqua DM* sebagai umpan *membrane electrolysis*
- T-6 = Tangki penampung larutan NaOH hasil regenerasi
- T-7 = Tangki limbah *membrane electrolysis*
- V-1 = Kran aliran biogas ke menuju pompa biogas
- V-2 = Kran aliran biogas ke rotameter R-2
- V-3 = Kran *recycle* absorbant ke T-3 (*normally close*)
- V-4 = Kran aliran larutan NaOH menuju rotameter R-1
- V-5 = Kran limbah absorbant ke T-4
- V-6 = Kran *sampling* biogas setelah proses *acid gas removal*
- R-1 = Rotameter absorbant ke *packed column* (45 L/min)
- R-2 = Rotameter biogas ke *packed column* (25 L/min)
- C-1 = Kompresor biogas menuju *packed column*

- PC-1 = *Packed column* untuk *acid gas removal*
(D = 7 cm, L = 100 cm, L_{packing} = 60 cm)
P-1 = Pompa (300 watt)
P-2 = Pompa (300 watt)
P-3 = Pompa (6 watt)
P-4 = Pompa (6 watt)
MC-1 = *Membrane electrolysis cell*

III.2.3 Skema Alat Penelitian



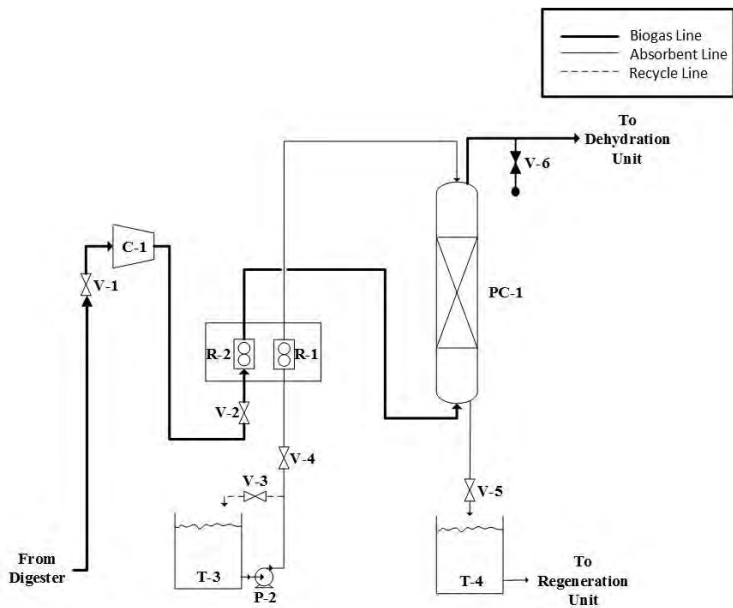
Gambar III.2 Reaktor Biogas 5000L



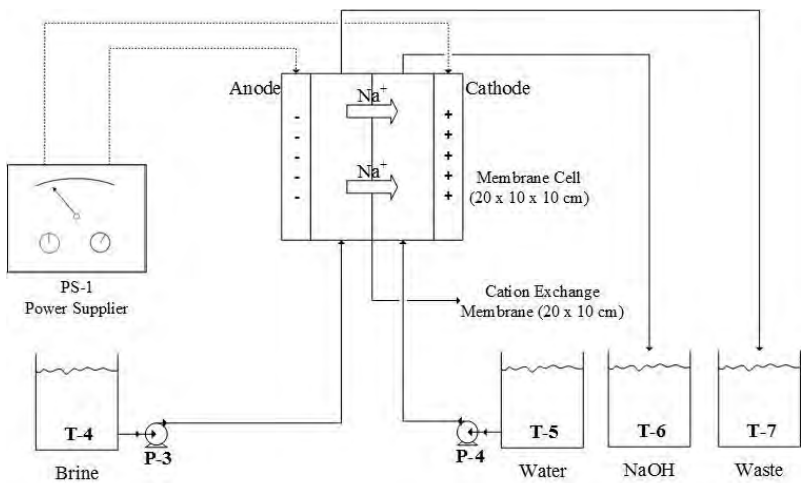
Gambar III.3 Skema Reaktor Biogas 5000 L



Gambar III.4 Gambar Unit *Acid Gas Removal* Tampak Depan (a) dan Tampak Belakang (b)



Gambar III.5 Skema Unit Acid Gas Removal



Gambar III.6 Skema Unit Regenerasi (*Membrane Electrolysis*)

III.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada :

1. Tekanan operasi = 760 mmHg (atmosferik)
2. Suhu = 28–32 °C
3. *Feed* = Biogas yang dibuat pada reaktor 5000L dengan kadar CH₄ 50–60% dan CO₂ 30-40%

Adapun variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Variabel tetap
 1. Konsentrasi larutan NaOH 0,4 M
 2. *Rate* larutan NaOH 25 L/menit dan *rate* biogas 5 L/menit
- b. Variabel bebas
 1. Tegangan 5 V, 10 V, 15 V, dan 20 V
 2. Luas permukaan elektroda, 80 cm² dan 144 cm²
 3. Temperatur larutan *brine*, 30°C dan 50°C
 4. Konsentrasi larutan elektrolit (KCl), 0,01 M; 0,05 M; 0,1 M; dan 0,3 M.
- c. Variabel Respon
 1. Persen *recovery* natrium
 2. Molaritas NaOH yang dihasilkan
 3. Produksi NaOH per energi

III.4 Prosedur Penelitian

III.4.1 Tahap Persiapan Biogas, Bahan dan Peralatan Penelitian

- a. Melarutkan 10 L molasses menggunakan air PDAM dengan perbandingan rasio molasses : air = 1 : 1. Kemudian dipompa menuju digester 5000L.
- b. Mensirkulasi setiap 2 hari sekali selama setengah jam dengan menggunakan pompa air SHIMIZU Model PC-260 BIT.
- c. Setelah 3-7 hari, biogas mulai diproduksi dan ditampung dalam gas *holder* dengan tekanan 55 cmH₂O gauge (1,055 atm).

- d. Mempersiapkan larutan absorban NaOH 0,4 M.
- e. Mempersiapkan peralatan unit *acid gas removal*.

III.4.2 Tahap *Acid Gas Removal*

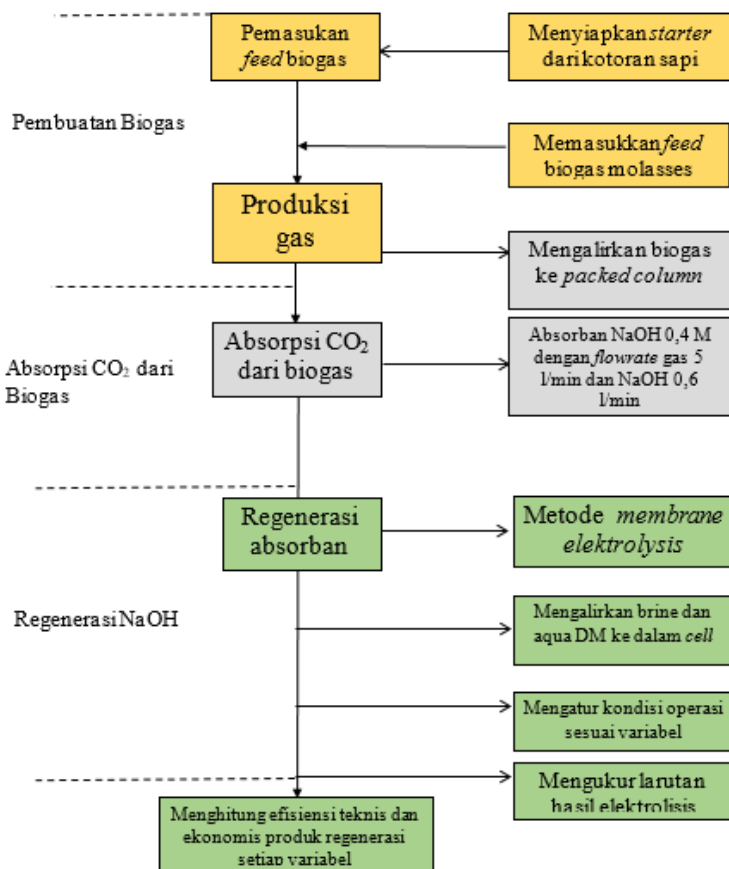
- a. Mengisi tangki penampung larutan absorban (*T-3*) dengan 60 L larutan NaOH 0,4 M.
- b. Mengalirkan larutan absorban ke dalam *packed column* (*PC-1*) dengan membuka *V-4* untuk laju alir 25 L/min pada pembacaan rotameter (*R-1*) dan menutup *V-3*, menunggu hingga larutan absorban keluar dari dasar *packed column* menuju tangki limbah absorban (*T-4*).
- c. Mengalirkan biogas dari *gas holder* (*T-2*) dengan membuka *V-1* yang terhubung dengan *booster compressor* (*C-1*) dan membuka *V-2* untuk mengatur laju alir pada rotameter (*R-1*) pada *rate* 5 L/min, kemudian biogas dialirkan menuju *packed column* (*PC-1*) hingga biogas dan larutan absorban berkontak pada *raschig ring*.
- d. Biogas yang keluar dari *packed column* (*PC-1*) mengalir menuju *unit dehydration*.
- e. Mematikan *power* pada pompa dan kompresor (*P-2* dan *C-1*) setelah selesai.

III.4.3 Tahap *Membrane Electrolysis*

- a. Mengisi *cell* katoda dalam *membrane electrolysis cell* (*MC-1*) dengan *aqua DM* sebanyak 800 mL.
- b. Mengisi *cell* anoda dalam *membrane electrolysis cell* (*MC-1*) dengan larutan *brine* sebanyak 800 mL.
- c. Menyalakan *power supplier* dengan tegangan 5 V.
- d. Mengukur pH larutan *brine* dan NaOH setiap 20 menit selama 3 jam dan mengukur arus pada power supplier setiap 20 menit selama 3 jam.
- e. Mengosongkan *membrane electrolysis cell* (*MC-1*).
- f. Mengulang prosedur a hingga e dengan variabel bebas tegangan 10 V, 15 V, dan 20 V.

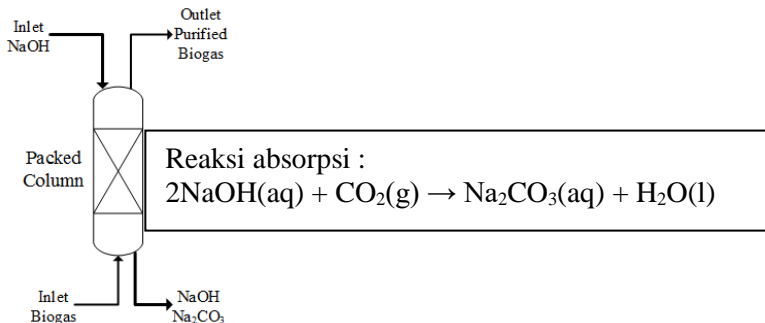
- g. Mengulang kembali prosedur a hingga f dengan variabel bebas luas elektroda 80 cm² dan 144 cm².
- h. Mengulang kembali prosedur a hingga f dengan variabel bebas temperatur *feed* 30°C dan 50°C.
- i. Mengulang kembali prosedur a hingga f dengan variabel bebas penambahan larutan elektrolit dengan konsentrasi 0,01 M; 0,05 M; 0,1 M; dan 0,3 M.

III.5 Diagram Alur Penelitian



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

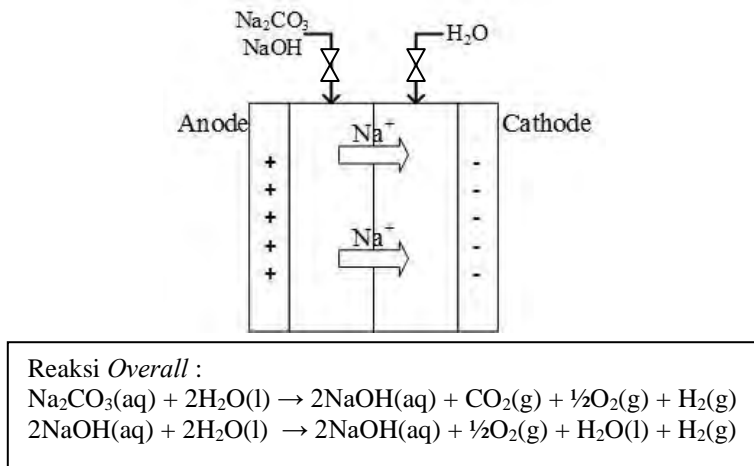
Aplikasi teknologi *membrane electrolysis* untuk regenerasi absorban dari unit *acid gas removal* dapat menjadi alternatif bagi industri kimia yang menggunakan NaOH sebagai absorban. Teknologi *membrane electrolysis* atau elektrodialisis menggunakan prinsip dasar elektrolisis dimana *cell* katoda dan anoda dipisahkan oleh membran kation yang bersifat selektif terhadap ion yang diinginkan yaitu dalam penelitian ini adalah ion natrium (Na^+). Trasportasi ion pada membran terjadi karena adanya *driving force* yang dapat berupa konveksi atau difusi dari masing-masing molekul dan tarik menarik antar muatan. Pada bab ini akan dibahas hasil penelitian secara teknis maupun ekonomis regenerasi absorban NaOH pada *acid gas removal* menggunakan metode *membrane electrolysis*. Pengamatan dilakukan pada variabel tegangan (5, 10, 15, dan 20 V), luas permukaan elektroda (80 cm^2 dan 144 cm^2), temperatur *feed* (30°C dan 50°C) dan penambahan larutan elektrolit KCl (0,01; 0,05; 0,1; dan 0,3 M) pada anoda.



Gambar IV.1 Skema unit *acid gas removal* dan reaksi absorpsi CO_2 dengan NaOH

Feed yang digunakan pada anoda adalah larutan hasil absorpsi CO_2 pada biogas dengan menggunakan absorban NaOH,

larutan ini disebut dengan *brine*. Proses absorpsi menggunakan *packed column* dengan *raschig ring*. Biogas yang digunakan berbahan baku molases dengan kandungan CO₂ sebesar 33% dikontakkan dengan larutan NaOH pada *packed column* dengan aliran *counter-current* sesuai skema unit *acid gas removal* pada Gambar IV.1. Hasil titrasi menunjukkan bahwa larutan *brine* limbah absorpsi mengandung 9,6 g/l natrium hidroksida (NaOH) dan 8,48 g/l natrium karbonat (Na₂CO₃) dengan pH awal 13.63. Natrium bikarbonat (NaHCO₃) tidak terbentuk dikarenakan sesuai stoikiometri reaksi kimianya, NaOH masih berlebih (*excess*). NaHCO₃ hanya terbentuk saat NaOH menjadi *limiting reactant* (Yoo, 2012).



Gambar IV.2 Skema *membrane electrolysis* dan reaksi *overall* hingga menjadi produk NaOH

Gas CO₂ dari biogas akan diabsorpsi oleh larutan NaOH menjadi Na₂CO₃. Larutan *brine* hasil absorpsi dimasukkan dalam *cell* anoda, sedangkan *aqua DM* (*demineralized*) dimasukkan dalam *cell* katoda sesuai dengan skema pada Gambar IV.2. Karena ada perbedaan potensial listrik di anoda dan katoda, maka ion Na⁺ tertarik ke *cell* katoda yang bermuatan negatif. Produk

utamanya adalah larutan NaOH sesuai reaksi *overall* pada skema di atas. Setelah itu, menggunakan variabel tegangan dan luas permukaan elektroda yang ditetapkan. Proses elektrolisis dilakukan secara *batch* selama 180 menit.

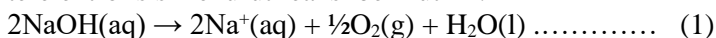
Pengamatan yang dilakukan adalah perubahan pH pada larutan di anoda dan katoda, kemudian menghitung molaritas larutan NaOH dan persen *recovery* natrium. Pengamatan dilakukan setiap 20 menit sekali. Persen *recovery* natrium dihitung dengan mengukur ion natrium yang telah bermigrasi ke *cell* katoda dibandingkan natrium total yang ada di *cell* anoda mengikuti persamaan berikut ini:

$$\%recovery\ natrium = \frac{Natrium\ di\ NaOH\ (g/l)}{Natrium\ total\ (g/l)} \times 100\%$$

Molaritas larutan NaOH dapat dihitung dari pengukuran pH yang telah dilakukan sebelumnya.

IV.1 Pengaruh Tegangan terhadap Hasil Elektrolisis

Pengaruh tegangan *power supplier* terhadap hasil elektrolisis dapat diamati dengan perubahan pH di *cell* katoda dan anoda. Dalam penelitian ini, digunakan variabel tegangan 5 hingga 20 V, kemudian perubahan pH larutan dalam *cell* diamati setiap 20 menit selama 3 jam. Gambar IV.3 (a) menunjukkan penurunan pH di dalam *cell* anoda setiap waktunya. Hal ini mengindikasikan larutan *feed* tersebut telah terurai dan terelektrolisis menurut reaksi berikut ini:



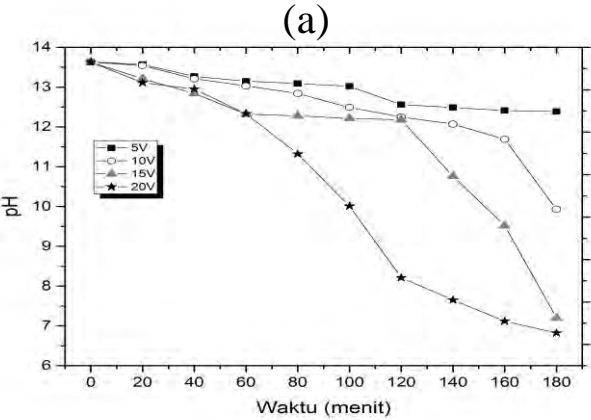
pH larutan *feed* semakin menurun karena senyawa basa penyusunnya telah terurai dan ion natrium telah bermigrasi ke *cell* katoda melalui membran penukar kation setiap waktunya. Penurunan pH larutan *feed* akan terjadi setiap waktunya (Bosko, 2013). Penurunan pH bervariasi sesuai dengan tegangan yang diberikan. Pada gambar IV.1 dapat dilihat semakin tinggi tegangan maka semakin besar pula penurunan pH larutan *feed*. Hal ini sesuai dengan penelitian Mandal (2016) yang menyatakan

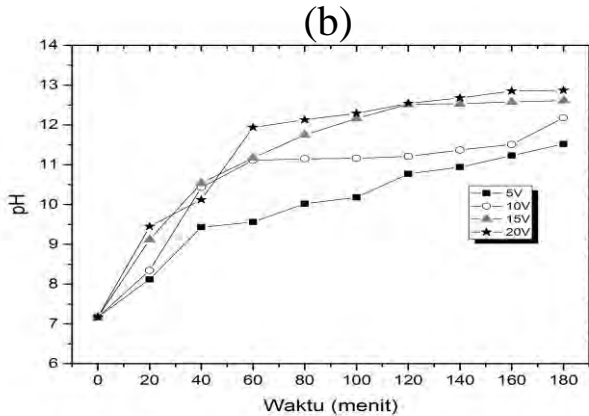
bahwa semakin besar tegangan yang diberikan maka reaksi elektrolisis yang terjadi semakin cepat.

Cell katoda berisi *aqua DM (demineralized)* dengan pH awal 7.17. Pada Gambar IV.3 didapatkan kenaikan pH dalam cell katoda setiap waktunya. Hal ini mengindikasikan H₂O telah bereaksi menjadi gas H₂ dan ion OH⁻ serta masuknya ion natrium ke dalam *cell* katoda. Reaksi dalam *cell* katoda adalah sebagai berikut:



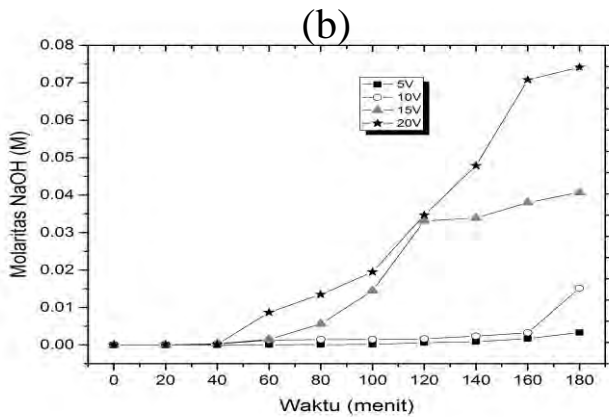
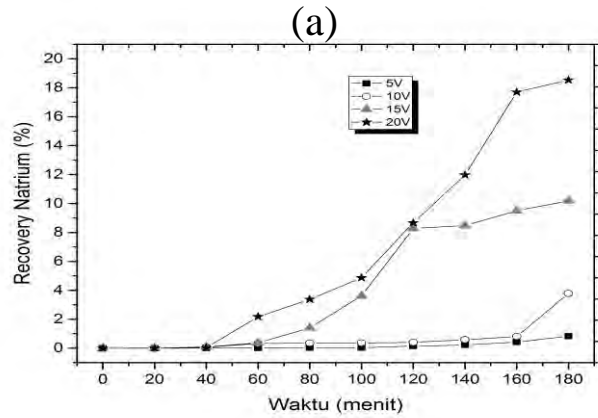
Larutan di *cell* katoda menjadi basa karena adanya ion OH⁻ dan ion natrium yang bereaksi menjadi larutan NaOH. Semakin lama waktu elektrolisis semakin tinggi pH larutan NaOH yang dihasilkan, karena konsentrasi NaOH yang didapat semakin besar (Simon, 2014). Dari Gambar IV.3 didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi tegangan yang diberikan, maka semakin besar kenaikan pH larutan dalam *cell* katoda. Tegangan yang dibutuhkan lebih besar daripada tegangan *cell* literatur (3-4V) dikarenakan banyaknya tegangan yang hilang (*overvoltage*) dalam *membrane electrolysis* ini. Tegangan yang hilang ini disebabkan *overvoltage* elektroda, hambatan dari larutan elektrolit, *membrane*, struktur *cell*, dan hambatan dari gelembung gas (Moorhouse, 2000).





Gambar IV.3 Perubahan pH di *cell* anoda (a) dan *cell* katoda (b) terhadap waktu pada tegangan tertentu dan luas elektroda 144 cm^2

Pengaruh tegangan yang diberikan terhadap persen *recovery* dan molaritas larutan NaOH yang didapat juga diamati. Gambar IV.4 menyatakan bahwa semakin tinggi tegangan yang diberikan maka semakin tinggi pula persen *recovery* natrium dan molaritas NaOH yang dihasilkan. Persen *recovery* dan molaritas NaOH paling tinggi (18,5% dan 0,074 M) didapat saat menggunakan tegangan 20 V, sedangkan paling rendah (0,83% dan 0,003 M) didapat pada tegangan 5 V dengan waktu elektrolisis 180 menit. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian *water electrolysis* oleh Mandal (2016) yang menyatakan bahwa semakin tinggi tegangan yang digunakan, maka semakin baik produk yang dihasilkan.



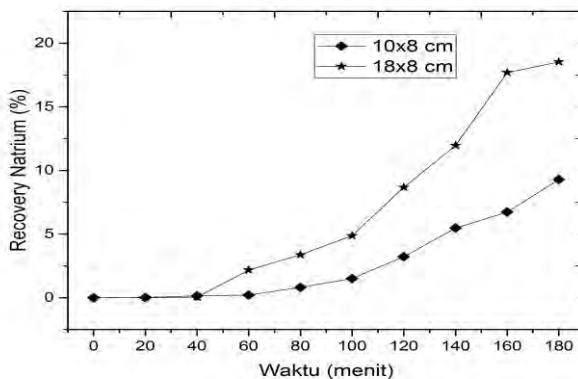
Gambar IV.4 Hubungan persen *recovery* natrium (a) dan molaritas NaOH (b) terhadap tegangan tertentu dengan luas elektroda 144 cm^2

IV.2 Pengaruh Luas Elektroda terhadap Hasil Elektrolisis

Pengaruh luas permukaan elektroda terhadap hasil elektrolisis juga diamati pada penelitian ini. Luas permukaan elektroda yang digunakan adalah 80 cm^2 ($10 \times 8 \text{ cm}$) dan 144 cm^2 ($18 \times 8 \text{ cm}$) dengan variasi tegangan 5 hingga 20 V. Kemudian persen *recovery* natrium tiap variabel luas permukaan dibandingkan. Gambar IV.5 menyatakan bahwa semakin tinggi luas permukaan elektroda maka semakin tinggi pula persen *recovery* natrium yang didapatkan pada semua variabel tegangan yang digunakan. Pada tegangan 20 volt, persen *recovery* natrium dengan luas elektroda 80 cm^2 (9,2%) lebih rendah daripada luas elektroda 144 cm^2 (18,5%). Hal ini disebabkan pada luas elektroda yang lebih besar, nilai *overpotential* lebih kecil daripada elektroda yang lebih kecil. *Overpotential* adalah tegangan yang hilang pada permukaan elektroda, sehingga dibutuhkan lebih banyak tegangan supaya reaksi elektrolisis dapat berjalan dengan baik (Bockris, 2002). *Overpotential* bergantung pada *current density* sesuai dengan persamaan Tafel berikut:

$$\eta a = a + b \log i$$

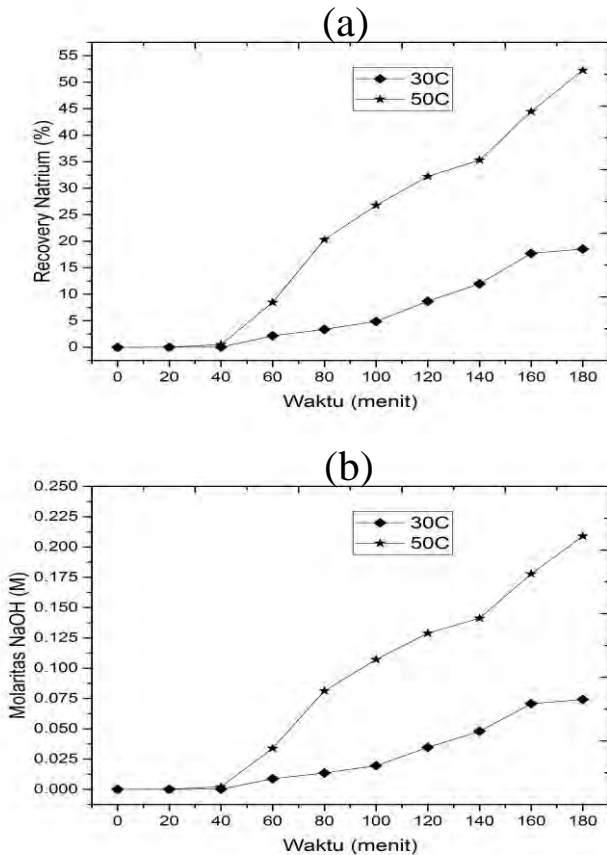
Dimana ηa merupakan *overpotential*, a dan b konstanta empiris, serta i adalah *current density*. Dapat kita lihat dari persamaan di atas bahwa *overpotential* meningkat secara linear dengan logaritma *current density*. Untuk menurunkan nilai *overpotential*, maka *current density* harus diminimalkan. Salah satu caranya adalah dengan memperbesar luas permukaan elektroda, *Current density* adalah arus listrik per luas permukaan elektroda. Dengan memperbesar luas permukaan elektroda, maka *current density* semakin kecil sehingga nilai *overpotential* juga menurun. Oleh karena itu, semakin tinggi luas permukaan elektroda maka hasil elektrolisis yang didapat juga semakin baik.



Gambar IV.5 Hubungan persen *recovery* natrium dan luas permukaan elektroda tertentu pada Tegangan 20V dengan waktu elektrolisis 180 menit

IV.3 Pengaruh Temperatur *Feed* terhadap Hasil Elektrolisis

Pada variabel ini, temperatur *feed* yang digunakan adalah 30°C dan 50°C. Larutan mula-mula dipanaskan hingga suhu yang diinginkan baru kemudian dimasukkan ke dalam *membrane cell*. Tegangan yang digunakan adalah 5V, 10V, 15V dan 20V, sedangkan luasan elektroda yang digunakan sebesar 144 cm². Pemilihan suhu 30°C adalah karena suhu tersebut merupakan suhu ruangan air, sedangkan pemilihan suhu 50°C adalah karena suhu tersebut merupakan suhu rata-rata yang didapat saat percobaan berlangsung tanpa pemanasan yang dilakukan sebelumnya.



Gambar IV.6 Hubungan persen *recovery* natrium (a) dan molaritas NaOH (b) terhadap temperatur *feed* pada tegangan 20 V dengan waktu elektrolisis 180 menit

Pada Gambar IV.6 dapat dilihat perbandingan persen *recovery* natrium dan molaritas NaOH yang didapat antara temperatur *feed* 30°C dan 50°C. Semakin tinggi temperatur *feed*, persen *recovery* natrium dan molaritas NaOH yang didapat semakin tinggi pula. Pada tegangan 20 V, persen *recovery*

natrium dan molaritas NaOH pada temperatur *feed* 50°C sebesar 52,2% dan 0,21 M, sedangkan pada temperatur *feed* 30°C hanya sebesar 18,5% dan 0,07 M

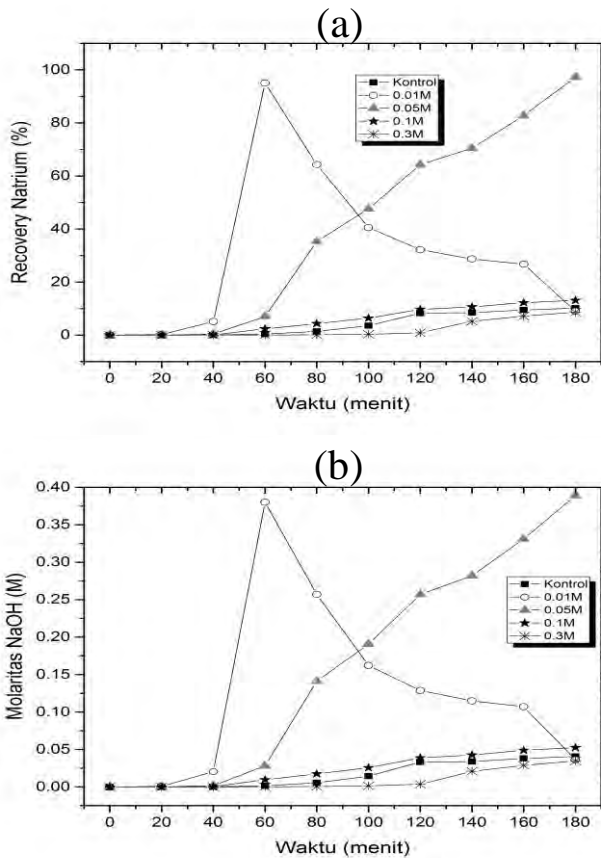
Hasil dari percobaan menggunakan temperatur *feed* lebih tinggi menunjukkan hasil yang lebih baik. Hal ini sesuai dengan literatur terdahulu, temperatur diketahui sebagai salah satu variabel yang berperan penting dalam elektrolisis. Proses elektrolisis jauh lebih efisien pada suhu yang lebih tinggi (Nikolic, 2007). Elektrolisis yang menggunakan temperatur *feed* sama dengan suhu ruangan membutuhkan energi listrik yang lebih besar agar reaksi elektrolisis dapat terjadi. Elektrolisis dengan suhu tinggi membutuhkan lebih sedikit energi untuk mencapai *current density* yang digunakan dibandingkan elektrolisis pada suhu ruangan (Stojic, 2002).

Selain itu, konduktifitas ion dan permukaan reaksi elektrolit meningkat pada suhu yang tinggi (Udagawa, 2007). Nagai (2003) juga menyatakan bahwa panas dapat mengurangi potensial *reversible* dari air (juga dikenal sebagai tegangan ekuilibrium). Karena parameter ini dapat memperbesar ukuran gelembung gas dan mengurangi kecepatan terbentuknya gas, hal ini menyebabkan kekosongan fraksi dalam elektrolit dan mengurangi efisiensi sebagai hasilnya.

IV.4 Pengaruh Penambahan Larutan Elektrolit terhadap Hasil Elektrolisis

Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan larutan elektrolit di *cell* katoda terhadap hasil elektrolisis. Larutan elektrolit yang dipakai adalah kalium klorida (KCl) dengan molaritas yang berbeda. KCl dipilih karena merupakan elektrolit kuat dengan nilai konduktivitas yang tinggi. Molaritas yang digunakan adalah 0,01; 0,05; 0,1; dan 0,3 M. Tegangan yang digunakan adalah 15 V. Penambahan KCl di *cell* katoda adalah sebanyak 80 ml atau 10% dari volume larutan *feed*. Kemudian perubahan pH, persen *recovery* natrium dan molaritas diamati setiap 20 menit selama 3 jam waktu elektrolisis. Hasil

elektrolisis tersebut dibandingkan dengan penelitian tanpa penambahan KCl (kontrol).



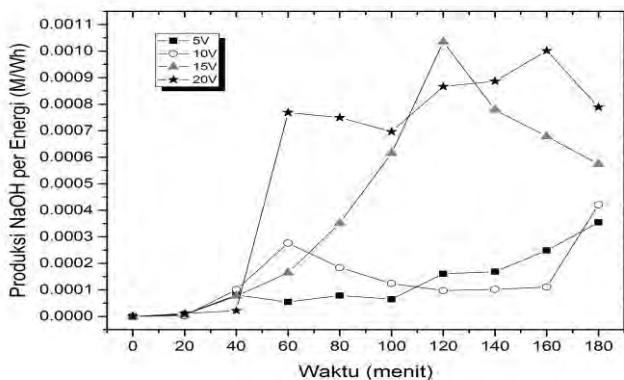
Gambar IV.7. Hubungan persen recovery natrium (a) dan molaritas NaOH (b) terhadap waktu pada 15 V dengan penambahan KCl

Gambar IV.7 menerangkan bahwa terdapat hasil yang bervariasi pada tiap molaritas KCl yang digunakan. Hasil yang lebih tinggi dari kontrol didapatkan pada penambahan KCl 0,01; 0,05; dan 0,1 M. Sedangkan penambahan KCl 0,3 M lebih rendah dari kontrol. Persen recovery natrium terbaik didapat pada penambahan KCl 0,01 M yaitu sebesar 95% selama 60 menit waktu elektrolisis. Terjadi penyimpangan pada penambahan KCl 0,01 M, dimana pH larutan NaOH mencapai 13,58 pada 60 menit pertama, kemudian pH menurun hingga 12,56 pada menit ke 180.

Penambahan larutan elektrolit dalam jumlah kecil terbukti dapat mempengaruhi hasil elektrolisis. Pada konsentrasi kecil menghasilkan persen *recovery* yang lebih tinggi daripada konsentrasi besar. Hal ini disebabkan penambahan KCl bertujuan untuk meningkatkan konduktifitas larutan *feed*. Semakin rendah konsentrasi larutan, konduktifitasnya semakin tinggi. Sedangkan pada konsentrasi tinggi elektrolit kuat terdapat gaya tarik antar ion yang berbeda muatan semakin kuat. Sehingga mempengaruhi kecepatan ion dalam larutan. Semakin cepat ion berpindah maka semakin cepat pula reaksi elektrolisisnya (Atkins, 2006).

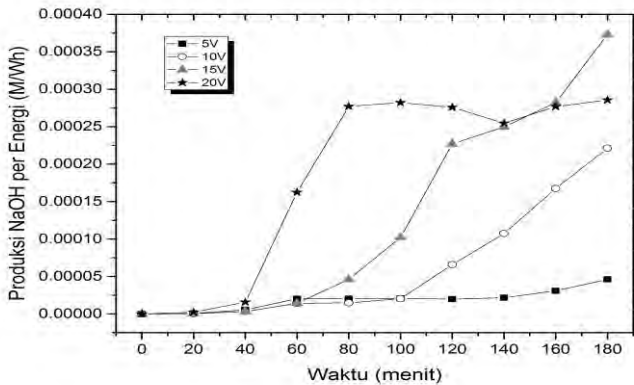
Ion kalium (K^+) tidak ikut berpindah karena membran yang dipakai hanya selektif terhadap ion natrium saja. Hal ini dapat dibuktikan pada hasil penelitian bahwa semakin tinggi konsentrasi larutan KCl yang digunakan, hasil elektrolisis semakin menurun. Selain itu, karena perbedaan potensial cell kalium yang lebih kecil dari natrium, maka tidak terjadi kompetisi untuk berpindah ke cell katoda antara kedua ion tersebut. Untuk lebih memastikan kandungan ion dalam larutan di cell katoda dapat menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Penambahan KCl sebagai elektrolit juga dapat menghasilkan produk samping yaitu gas Cl_2 . Kekurangan dari penambahan larutan KCl ini adalah menimbulkan bercak kuning pada elektroda maupun membran yang digunakan, sehingga dapat mengurangi kinerja dari proses elektrolisis itu sendiri.

4.5 Analisa Ekonomi Regenerasi NaOH Menggunakan *Membrane Electrolisis*



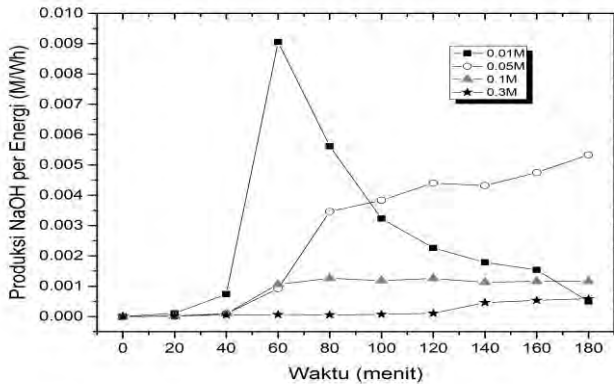
Gambar IV.8 Hubungan antara produksi NaOH per energi terhadap waktu elektrolisis pada variabel temperatur *feed* 30°C

Semakin lama waktu elektrolisis memang menyebabkan konsentrasi yang didapat semakin besar, namun tidak selamanya akan menghasilkan hasil yang efisien saat dibandingkan dengan daya yang dibutuhkan. Semakin tinggi nilai produksi NaOH per energi yang digunakan maka proses elektrolisis tersebut semakin baik dan efisien. Berdasarkan Gambar IV.8, dapat diketahui bahwa konsentrasi produk yang didapat bila dibandingkan dengan energi yang dikeluarkan bervariasi tergantung dengan tegangan dan waktu elektrolisis yang digunakan. Semakin tinggi nilai molaritas yang digunakan maka semakin tinggi pula efisiensi dari proses tersebut. Pada variabel temperatur *feed* 30°C, didapatkan produk yang efisien saat menggunakan tegangan sebesar 15 V dan waktu elektrolisis selama 120 menit dengan nilai 0,001 M/Wh. Bila dengan acuan biaya listrik Rp1335/kWh, maka didapatkan *operation cost* sebesar Rp40.316/kg NaOH.



Gambar IV.9 Hubungan antara produksi NaOH per energi terhadap waktu elektrolisis pada variabel temperatur *feed* 50°C

Hal serupa juga diamati pada variabel temperatur *feed* 50°C, ditunjukkan pada Gambar IV.9 kenaikan nilai produksi NaOH per energi yang dibutuhkan meningkat seiring dengan waktu elektrolisis. Pada variabel ini menghasilkan kesimpulan bahwa pada tegangan 15 V dan waktu elektrolisis selama 180 menit merupakan hasil terbaik dengan nilai 0,00037 M/Wh atau sebesar Rp11.614/kg NaOH. Nilai ini lebih ekonomis daripada yang dihasilkan oleh variabel temperatur *feed* 50°C. Elektrolisis yang menggunakan temperatur *feed* sama dengan suhu ruangan membutuhkan energi listrik yang lebih besar agar reaksi elektrolisis dapat terjadi. Elektrolisis dengan suhu tinggi membutuhkan lebih sedikit energi untuk mencapai *current density* yang digunakan dibandingkan elektrolisis pada suhu ruangan (Stojic, 2002).



Gambar IV.10 Hubungan antara produksi NaOH per energi terhadap waktu elektrolisis pada variabel penambahan larutan KCl

Dari Gambar IV.10 dapat dilihat bahwa produksi NaOH per energi yang dikeluarkan mencapai puncak pada variabel KCl 0,01M dengan waktu elektrolisis 60 menit. Nilai produksi NaOH per energi yang digunakan paling efisien sebesar 0,009 M/Wh, atau setara dengan Rp4.608,7/kg NaOH. Variabel KCl 0,01M menghasilkan proses paling ekonomis pada penelitian ini. Karena pada konsentrasi tinggi elektrolit kuat terdapat gaya tarik antar ion yang berbeda muatan semakin kuat. Sehingga mempengaruhi kecepatan ion dalam larutan. Semakin cepat ion berpindah maka semakin cepat pula reaksi elektrolisisnya (Atkins, 2006). Hasil ini juga menunjukkan bahwa regenerasi NaOH menggunakan *membrane electrolysis* cukup layak digunakan secara ekonomis mengingat harga NaOH teknis di pasaran sebesar Rp28.500/kg. Tetapi masih perlu dilakukan penelitian lanjutan agar hasilnya lebih efisien dan dapat diaplikasikan dalam skala industri.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPENDIKS A

DATA HASIL PENELITIAN

Tabel A.1 Data Hasil Penelitian Pengaruh Tegangan pada
Elektroda 18x8 cm dan Temperatur Feed 30°C

Tegangan (V)	Waktu (menit)	pH anoda	pH katoda	Arus (A)
5	0	7.17	13.63	0.1
	20	8.12	13.57	0.1
	40	9.43	13.27	0.1
	60	9.56	13.15	0.2
	80	10.02	13.09	0.4
	100	10.18	13.02	0.6
	120	10.77	12.56	0.8
	140	10.94	12.49	0.9
	160	11.23	12.41	1
	180	11.52	12.39	1.5
10	0	7.17	13.63	0.1
	20	8.34	13.54	0.3
	40	10.43	13.21	0.5
	60	11.11	13.03	0.6
	80	11.15	12.84	0.9
	100	11.16	12.49	1.2
	120	11.21	12.25	1.5
	140	11.37	12.07	1.9
	160	11.51	11.69	1.9
	180	12.18	9.93	2
15	0	7.17	13.63	0.1
	20	9.12	13.21	0.4
	40	10.54	12.84	0.5
	60	11.17	12.32	0.9

	80	11.75	12.28	1.4
	100	12.16	12.21	1.5
	120	12.52	12.18	1.7
	140	12.53	10.76	2.3
	160	12.58	9.52	2.5
	180	12.61	7.2	3
20	0	7.17	13.63	0.1
	20	9.45	13.11	0.4
	40	10.12	12.95	0.5
	60	11.94	12.33	0.8
	80	12.13	11.32	1
	100	12.29	10.01	1.5
	120	12.54	8.21	1.8
	140	12.68	7.65	2.1
	160	12.85	7.12	2.5
	180	12.87	6.82	3.5

Tabel A.2 Data Hasil Penelitian Pengaruh Tegangan pada Elektroda 10x8 cm

Tegangan (V)	Waktu (menit)	pH anoda	pH katoda	Arus (A)
5	0	7.17	13.63	0.1
	20	7.58	12.87	0.1
	40	7.82	12.18	0.1
	60	8.52	11.36	0.2
	80	9.87	11.22	0.2
	100	9.99	11.15	0.2
	120	10.17	11.07	0.3
	140	10.23	10.93	0.3
	160	10.54	10.75	0.3

	180	11.1	10.67	0.4
10	0	7.17	13.63	0.1
	20	8.49	12.8	0.2
	40	8.79	12.63	0.5
	60	9.12	12.39	0.6
	80	9.65	12.16	0.9
	100	10.54	12.05	1.2
	120	10.87	11.64	1.5
	140	11.12	11.6	1.9
	160	11.95	10.93	1.9
	180	12.11	10.29	1.9
15	0	7.17	13.63	0.1
	20	8.6	13.26	0.4
	40	9.8	13.03	0.5
	60	10.06	12.93	0.9
	80	10.95	12.69	1.4
	100	11.31	12.36	1.5
	120	11.48	11.67	1.7
	140	11.54	11.23	1.8
	160	12.13	10.12	1.7
	180	12.34	9.54	1.6
20	0	7.17	13.63	0.1
	20	9.87	12.28	0.4
	40	10.76	12.12	0.5
	60	10.93	11.97	0.5
	80	11.51	11.89	1.2
	100	11.78	11.6	1.2
	120	12.11	11.18	1.8
	140	12.34	10.43	2.1
	160	12.43	10.13	1.8
	180	12.57	9.12	1.3

Tabel A.3 Data Hasil Penelitian Pengaruh Temperatur Feed 50°C

Tegangan (V)	Waktu (menit)	pH anoda	pH katoda	Arus (A)	Suhu (°C)
5	0	7.17	13.63	0.1	50
	20	9.01	13.42	0.3	45.1
	40	10.21	13.11	0.8	43.1
	60	10.98	12.67	1	41.2
	80	11.13	12.61	0.8	43.2
	100	11.24	12.57	0.8	45.2
	120	11.31	12.51	0.7	46.6
	140	11.42	12.48	0.6	47.3
	160	11.64	12.46	0.5	48.1
	180	11.87	12.45	0.5	49.3
10	0	7.17	13.63	0.1	50
	20	9.03	13.42	0.3	48.1
	40	10.28	13.04	0.5	46.2
	60	11.13	12.41	1	44.3
	80	11.29	12.19	0.9	46.2
	100	11.54	11.87	0.8	48.1
	120	12.14	11.37	0.7	49.5
	140	12.43	11.02	0.7	50.5
	160	12.69	10.54	0.6	51.2
	180	12.87	9.12	0.6	52.1
15	0	7.17	13.63	0.1	50
	20	9.14	13.13	1	50.2
	40	10.46	12.54	2.1	51.2
	60	11.31	11.8	2.5	56.6
	80	11.97	10.43	1.5	59.1
	100	12.43	9.21	1.2	62.3

	120	12.87	7.88	1	67.4
	140	12.99	7.14	0.7	61.4
	160	13.11	6.57	0.5	59.1
	180	13.29	6.18	0.4	57.4
20	0	7.17	13.63	0.1	50
	20	10.13	13.32	1.5	54.3
	40	11.31	12.54	3.5	59.4
	60	12.53	11.65	5	62.3
	80	12.91	9.87	2	65.7
	100	13.03	8.43	1.5	67.3
	120	13.11	7.63	0.9	71.3
	140	13.15	7.01	0.7	65.2
	160	13.25	6.13	0.6	61.1
	180	13.32	6.04	0.4	58.6

Tabel A.4 Data Hasil Penelitian Pengaruh Penambahan Larutan Elektrolit KCl

Tegangan (V)	Molaritas (M)	% v/v	Waktu (menit)	Arus (A)	pH kato-da	pH anoda
15	0.01	10	0	0.1	7.17	13.6
			20	3	10.92	11.2
			40	5	12.31	9.12
			60	0.7	13.58	7.61
			80	0.8	13.41	7.41
			100	1	13.21	7.12
			120	1.7	13.11	6.21
			140	1.2	13.06	5.71
			160	1	13.03	4.82
			180	0.5	12.56	4.32
	0.05		0	0.1	7.17	13.5

			20	2	9.54	13.1
			40	3	11.21	12.8
			60	2.2	12.45	12.4
			80	1.8	13.15	10.4
			100	1.8	13.28	8.76
			120	1.7	13.41	7.44
			140	1	13.45	6.51
			160	0.8	13.52	5.76
			180	0.5	13.59	4.81
	0.1		0	0.1	7.17	13.4
			20	0.5	9.41	13.4
			40	0.9	10.67	13.0
			60	0.7	11.98	12.5
			80	1.2	12.24	12.0
			100	2	12.41	11.4
			120	1.7	12.59	10.2
			140	1	12.63	9.43
			160	0.7	12.69	7.41
	0.3		180	0.5	12.72	6.54
			0	0.1	7.17	13.2
			20	0.3	9.32	13.1
			40	0.4	10.13	12.8
			60	0.7	10.54	12.6
			80	1	10.76	11.4
			100	3	11.14	10.1
			120	2.7	11.55	9.45
			140	1.9	12.32	8.76
	160		1.5	12.46	7.43	

Tabel A.5 Hasil Perhitungan %*Recovery*, Molaritas, dan Energi yang Digunakan pada Variabel Temperatur *Feed* 30°C

Tegangan (V)	Waktu (menit)	Konsentrasi NaOH (M)	% <i>Recovery</i> Natrium	Konsentrasi Energi (M/Wh)	Energi/ Produk (kWh/kg)	Operation cost (Rp)/ Kg NaOH
5	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	1.32E-06	3.30E-04	7.91E-06	3.95E+03	5,274,485
	40	2.69E-05	6.73E-03	8.07E-05	3.87E+02	516,666
	60	3.63E-05	9.08E-03	5.45E-05	5.74E+02	766,020
	80	1.05E-04	2.62E-02	7.85E-05	3.98E+02	531,215
	100	1.51E-04	3.78E-02	6.49E-05	4.82E+02	643,144
	120	5.89E-04	1.47E-01	1.61E-04	1.95E+02	259,778
	140	8.71E-04	2.18E-01	1.69E-04	1.85E+02	247,481
	160	1.70E-03	4.25E-01	2.49E-04	1.26E+02	167,866
	180	3.31E-03	8.28E-01	3.55E-04	8.81E+01	117,589
10	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	2.19E-06	5.47E-04	2.19E-06	1.43E+04	19,069,148
	40	2.69E-04	6.73E-02	1.01E-04	3.10E+02	413,333
	60	1.29E-03	3.22E-01	2.76E-04	1.13E+02	151,126
	80	1.41E-03	3.53E-01	1.84E-04	1.70E+02	226,432
	100	1.45E-03	3.61E-01	1.24E-04	2.52E+02	336,727
	120	1.62E-03	4.05E-01	9.73E-05	3.21E+02	428,726
	140	2.34E-03	5.86E-01	1.02E-04	3.07E+02	409,316

	160	3.24E-03	8.09E-01	1.10E-04	2.83E+02	378,175
	180	1.51E-02	3.78E+00	4.20E-04	7.43E+01	99,228
	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	1.32E-05	3.30E-03	6.59E-06	4.74E+03	6,329,382
	40	3.47E-04	8.67E-02	7.71E-05	4.06E+02	541,432
	60	1.48E-03	3.70E-01	1.64E-04	1.90E+02	253,848
	80	5.62E-03	1.41E+00	3.51E-04	8.89E+01	118,700
	100	1.45E-02	3.61E+00	6.15E-04	5.08E+01	67,826
	120	3.31E-02	8.28E+00	1.03E-03	3.02E+01	40,316
	140	3.39E-02	8.47E+00	7.79E-04	4.01E+01	53,558
	160	3.80E-02	9.50E+00	6.79E-04	4.60E+01	61,450
	180	4.07E-02	1.02E+01	5.74E-04	5.45E+01	72,709
	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	2.82E-05	7.05E-03	1.06E-05	2.96E+03	3,947,299
	40	1.32E-04	3.30E-02	2.20E-05	1.42E+03	1,898,814
	60	8.71E-03	2.18E+00	7.68E-04	4.07E+01	54,286
	80	1.35E-02	3.37E+00	7.49E-04	4.17E+01	55,668
	100	1.95E-02	4.87E+00	6.96E-04	4.49E+01	59,909
	120	3.47E-02	8.67E+00	8.67E-04	3.61E+01	48,127
	140	4.79E-02	1.20E+01	8.86E-04	3.53E+01	47,068
	160	7.08E-02	1.77E+01	1.00E-03	3.12E+01	41,643
	180	7.41E-02	1.85E+01	7.89E-04	3.96E+01	52,900

Tabel A.6 Hasil Perhitungan %Recovery, Molaritas, dan Energi yang Digunakan pada Variabel Temperatur Feed 50°C

Tegangan (V)	Waktu (menit)	Konsentrasi NaOH (M)	%Recovery Natrium	Konsentrasi Energi (M/Wh)	Energi/ Produk (kWh/kg)	Operation cost (Rp)/ Kg NaOH
5	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	1.02E-05	2.56E-03	7.59E-07	1.53E+03	2,068,994
	40	1.62E-04	4.05E-02	5.50E-06	3.33E+02	478,664
	60	9.55E-04	2.39E-01	2.03E-05	1.15E+02	155,188
	80	1.35E-03	3.37E-01	2.06E-05	1.12E+02	151,718
	100	1.74E-03	4.34E-01	2.06E-05	1.11E+02	150,259
	120	2.04E-03	5.10E-01	1.98E-05	1.12E+02	152,087
	140	2.63E-03	6.58E-01	2.16E-05	9.90E+01	134,155
	160	4.37E-03	1.09E+00	3.09E-05	6.56E+01	88,920
	180	7.41E-03	1.85E+00	4.61E-05	4.22E+01	57,120
10	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	1.07E-05	2.68E-03	3.97E-07	2.92E+03	3,951,749
	40	1.91E-04	4.76E-02	3.22E-06	4.37E+02	592,595
	60	1.35E-03	3.37E-01	1.42E-05	1.39E+02	188,339
	80	1.95E-03	4.87E-01	1.47E-05	1.44E+02	195,448
	100	3.47E-03	8.67E-01	2.04E-05	1.05E+02	142,474
	120	1.38E-02	3.45E+00	6.58E-05	3.17E+01	42,945
	140	2.69E-02	6.73E+00	1.07E-04	1.90E+01	25,696

15	160	4.90E-02	1.22E+01	1.67E-04	1.17E+01	15,850
	180	7.41E-02	1.85E+01	2.21E-04	8.57E+00	11,614
	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	1.38E-05	3.45E-03	3.39E-07	1.13E+04	15,337,668
	40	2.88E-04	7.21E-02	3.21E-06	1.68E+03	2,275,731
	60	2.04E-03	5.10E-01	1.42E-05	4.29E+02	580,694
	80	9.33E-03	2.33E+00	4.61E-05	1.19E+02	161,071
	100	2.69E-02	6.73E+00	1.02E-04	4.82E+01	65,289
	120	7.41E-02	1.85E+01	2.27E-04	1.96E+01	26,561
	140	9.77E-02	2.44E+01	2.50E-04	1.60E+01	21,665
	160	1.29E-01	3.22E+01	2.82E-04	1.27E+01	17,256
	180	1.95E-01	4.87E+01	3.73E-04	8.73E+00	11,835
	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	1.35E-04	3.37E-02	2.34E-06	2.32E+03	3,138,986
	40	2.04E-03	5.10E-01	1.58E-05	5.10E+02	691,302
	60	3.39E-02	8.47E+00	1.62E-04	6.15E+01	83,310
	80	8.13E-02	2.03E+01	2.77E-04	3.08E+01	41,675
	100	1.07E-01	2.68E+01	2.82E-04	2.62E+01	35,566
	120	1.29E-01	3.22E+01	2.76E-04	2.33E+01	31,554
20	140	1.41E-01	3.53E+01	2.55E-04	2.23E+01	30,177
	160	1.78E-01	4.45E+01	2.77E-04	1.84E+01	24,923
	180	2.09E-01	5.22E+01	2.86E-04	1.61E+01	21,753

Tabel A.7 Hasil Perhitungan %Recovery, Molaritas, dan Energi yang Digunakan pada Variabel Penambahan Larutan KCl

Tegangan (V)	Molaritas (M)	Waktu (menit)	Konsentrasi NaOH (M)	%Recovery Natrium	Konsentrasi Energi (M/Wh)	Energi/Produk (kWh/kg)	Operation cost (Rp)/Kg NaOH
15	0.01	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
		20	8.32E-04	2.08E-01	1.07E-04	2.91E+02	388,717
		40	2.04E-02	5.10E+00	7.36E-04	4.25E+01	56,701
		60	3.80E-01	9.50E+01	9.05E-03	3.45E+00	4,609
		80	2.57E-01	6.43E+01	5.62E-03	5.56E+00	7,425
		100	1.62E-01	4.05E+01	3.23E-03	9.68E+00	12,926
		120	1.29E-01	3.22E+01	2.26E-03	1.38E+01	18,459
		140	1.15E-01	2.87E+01	1.79E-03	1.75E+01	23,346
		160	1.07E-01	2.68E+01	1.54E-03	2.03E+01	27,157
	0.05	180	3.63E-02	9.08E+00	4.94E-04	6.33E+01	84,454
		0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
		20	3.47E-05	8.67E-03	6.60E-06	4.73E+03	6,316,705
		40	1.62E-03	4.05E-01	9.14E-05	3.42E+02	456,593
		60	2.82E-02	7.05E+00	9.17E-04	3.41E+01	45,517
		80	1.41E-01	3.53E+01	3.47E-03	9.02E+00	12,035
		100	1.91E-01	4.76E+01	3.83E-03	8.16E+00	10,892
		120	2.57E-01	6.43E+01	4.39E-03	7.11E+00	9,495

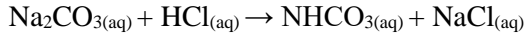
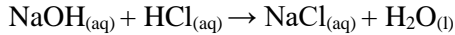
0.1	140	2.82E-01	7.05E+01	4.32E-03	7.23E+00	9,659
	160	3.31E-01	8.28E+01	4.75E-03	6.58E+00	8,788
	180	3.89E-01	9.73E+01	5.33E-03	5.86E+00	7,828
	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	2.57E-05	6.43E-03	1.71E-05	1.82E+03	2,434,572
	40	4.68E-04	1.17E-01	9.35E-05	3.34E+02	445,966
	60	9.55E-03	2.39E+00	1.06E-03	2.95E+01	39,316
	80	1.74E-02	4.34E+00	1.26E-03	2.47E+01	33,009
	100	2.57E-02	6.43E+00	1.18E-03	2.64E+01	35,301
	120	3.89E-02	9.73E+00	1.25E-03	2.49E+01	33,242
	140	4.27E-02	1.07E+01	1.13E-03	2.77E+01	36,919
	160	4.90E-02	1.22E+01	1.17E-03	2.68E+01	35,775
	180	5.25E-02	1.31E+01	1.17E-03	2.68E+01	35,772
	0	1.48E-07	3.70E-05	0.00E+00	0.00E+00	-
	20	2.09E-05	5.22E-03	2.09E-05	1.50E+03	1,996,785
	40	1.35E-04	3.37E-02	4.91E-05	6.37E+02	850,480
	60	3.47E-04	8.67E-02	6.30E-05	4.96E+02	661,750
	80	5.75E-04	1.44E-01	5.90E-05	5.29E+02	706,864
0.3	100	1.38E-03	3.45E-01	6.99E-05	4.47E+02	596,896
	120	3.55E-03	8.87E-01	1.04E-04	2.99E+02	399,770
	140	2.09E-02	5.22E+00	4.59E-04	6.81E+01	90,854
	160	2.88E-02	7.21E+00	5.34E-04	5.85E+01	78,113
	180	3.47E-02	8.67E+00	5.88E-04	5.32E+01	70,988

APPENDIKS B PERHITUNGAN

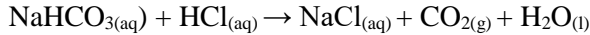
1. Perhitungan komposisi larutan *feed cell* anoda (brine) dengan metode titrasi

Menghitung NaOH yang tersisa dalam larutan *feed* menggunakan metode Warder (Benedetti-Pichler, 1939) :

- a. Sampel + PP dititrasi dengan HCl, reaksinya:



- b. Sampel + MO dititrasi dengan HCl, reaksinya:



Volume HCl → menetralkan NaOH = $V_{\text{PP}} - V_{\text{MO}}$

Volume HCl → menetralkan $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 2 \times V_{\text{MO}}$

Perhitungan :

$$\begin{aligned} N_{\text{karbonat}} \times V_{\text{karbonat}} &= N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}} \\ \text{ekivalen} \times \frac{n_{\text{karbonat}}}{V_{\text{karbonat}}} \times V_{\text{karbonat}} &= N_{\text{HCl}} \times V_{\text{titrasi karbonat}} \\ \text{ekivalen} \times \frac{m_{\text{karbonat}}}{BM_{\text{karbonat}}} &= N_{\text{HCl}} \times V_{\text{karbonat}} \\ m_{\text{karbonat}} &= \frac{N_{\text{HCl}} \times V_{\text{titrasi karbonat}} \times BM_{\text{karbonat}}}{2} \\ N_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} &= N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}} \\ \text{ekivalen} \times \frac{n_{\text{NaOH}}}{V_{\text{NaOH}}} \times V_{\text{NaOH}} &= N_{\text{HCl}} \times V_{\text{titrasi NaOH}} \\ \text{ekivalen} \times \frac{m_{\text{NaOH}}}{BM_{\text{NaOH}}} &= N_{\text{HCl}} \times V_{\text{titrasi NaOH}} \\ m_{\text{NaOH}} &= N_{\text{HCl}} \times V_{\text{titrasi NaOH}} \times BM_{\text{NaOH}} \end{aligned}$$

Diketahui :

$$N_{\text{HCl}} = 0,1 \text{ N}$$

$$BM \text{ NaOH} = 40 \text{ g/gmol}$$

$$BM \text{ Na}_2\text{CO}_3 = 106 \text{ g/gmol}$$

$$V_{\text{sampel}} = 5 \text{ ml}$$

$$V_{\text{PP}} = 16 \text{ ml} \rightarrow V_{\text{titrasi NaOH}} = 12 \text{ ml}$$

$$V_{\text{MO}} = 4 \text{ ml} \rightarrow V_{\text{titrasi karbonat}} = 8 \text{ ml}$$

$$m_{\text{NaOH}} = N_{\text{HCl}} \times V_{\text{titrasi NaOH}} \times BM_{\text{NaOH}}$$

$$m_{\text{NaOH}} = 0,1 \times 12 \times 40$$

$$m_{\text{NaOH}} = \frac{48 \text{ mg}}{5 \text{ ml}} = 9,6 \text{ g/l}$$

$$m_{\text{karbonat}} = \frac{N_{\text{HCl}} \times V_{\text{titrasi karbonat}} \times BM_{\text{karbonat}}}{2}$$

$$m_{\text{karbonat}} = \frac{0,1 \times 8 \times 106}{2}$$

$$m_{\text{karbonat}} = \frac{42,4 \text{ mg}}{5 \text{ ml}} = 8,48 \text{ g/l}$$

2. Perhitungan molaritas NaOH

Contoh perhitungan NaOH dengan pH = 13.59

(a) Menghitung pOH

$$pOH = 14 - pH$$

$$pOH = 14 - 13,59$$

$$pOH = 0,41$$

(b) Menghitung konsentrasi OH⁻

$$pOH = -\log(OH^-)$$

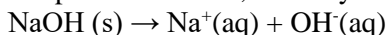
$$OH^- = 10^{-pOH}$$

$$OH^- = 10^{-0,41}$$

$$OH^- = 0,389 \text{ M}$$

(c) Menghitung molaritas NaOH

NaOH adalah elektrolit kuat, sehingga NaOH terionisasi sempurna dalam air, reaksinya sebagai berikut :



Karena ion Na⁺ dan ion OH⁻ setara, maka :

$$Na^+ = OH^-$$

$$Na^+ = 0,389 \text{ M}$$

3. Perhitungan massa natrium dalam larutan NaOH

(a) Menghitung massa natrium total

Diasumsikan massa natrium yang terdapat di larutan NaOH 0,4 M sama dengan natrium yang terdapat di larutan feed. Volume yang digunakan adalah 1 liter.

$$M = \frac{n}{V}$$

$$n = \frac{m}{BM}$$

$$M = \frac{m}{BM} \times \frac{1}{V}$$

$$m = M \times BM \times V$$

$$m = 0,4 \times 23 \times 1$$

$$m = 9,2 \text{ g}$$

(b) Menghitung massa natrium dalam larutan NaOH

Contoh perhitungan dengan $M = 0,389 \text{ M}$

$$m = M \times BM \times V$$

$$m = 0,389 \times 23 \times 1$$

$$m = 8,947 \text{ g}$$

4. Perhitungan persen recovery natrium

Persen *recovery* natrium didapatkan dengan menghitung natrium dalam larutan NaOH dibandingkan dengan larutan feed cell katoda.

Contoh perhitungan dengan massa natrium dalam NaOH 8,947 gram.

%Recovery natrium

$$= \frac{\text{massa natrium dalam NaOH}}{\text{massa natrium total dalam feed}} \times 100\%$$

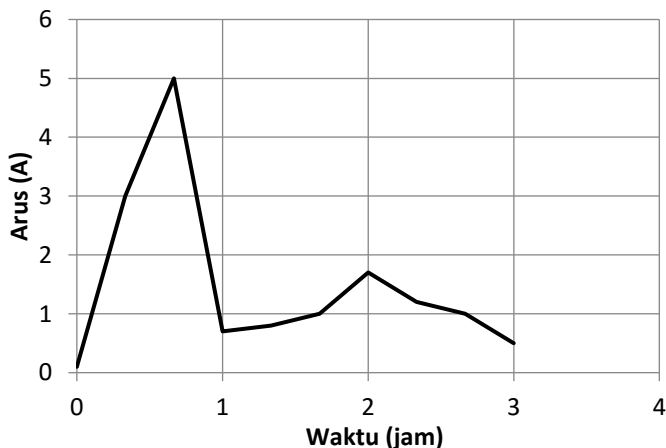
$$\%Recovery \text{ natrium} = \frac{8,947}{9,2} \times 100\%$$

$$\%Recovery \text{ natrium} = 97,26\%$$

5. Perhitungan *power* yang digunakan dalam elektrolisis
Contoh perhitungan dengan variabel penambahan KCl 0,01 M, $V = 15$ volt dan $t = 60$ menit.

$$P = V \times I \times t$$

karena I berubah ubah maka ditentukan luasan perubahannya terhadap waktu



Gambar B.1 Hubungan arus terhadap waktu elektrolisis dengan penambahan KCl 0,01 M

maka didapat perbandingan molaritas sebesar :

$$P = V \times I \times t$$

$$P = 15 V \times 2,8 A \times 1 h$$

$$P = 42 Wh$$

6. Perhitungan *operational cost*
Contoh perhitungan dengan variable penambahan KCl 0,01 M, $V = 15$ volt, $t = 60$ menit, $P = 42 Wh$ dan $M_{NaOH} = 0,38$ dengan volume 800 ml

(1) Menghitung massa NaOH

$$n = M \times V$$

$$n = 0,38 \times 0,8$$

$$\begin{aligned}
 n &= 0,304 \text{ mol} \\
 m &= 0,304 \times 40 \\
 m &= 12,16 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

(2) Menghitung harga per kg NaOH

Daya yang dibutuhkan tiap kg produk =

$$\frac{1000g}{1kg} \times \frac{1kWh}{1000Wh} \times 42Wh \times \frac{1}{12,6Kg} = 3,45 \text{ kwh/ kg}$$

NaOH

dengan biaya listrik Rp 1355/kWh, maka :

$$\begin{aligned}
 \text{Operational cost} &= 3,45 \text{ kWh/ kg NaOH} \times \text{Rp } 1355/ \text{ kwh} \\
 &= \text{Rp } 4.605/ \text{ kg NaOH}
 \end{aligned}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPENDIKS C

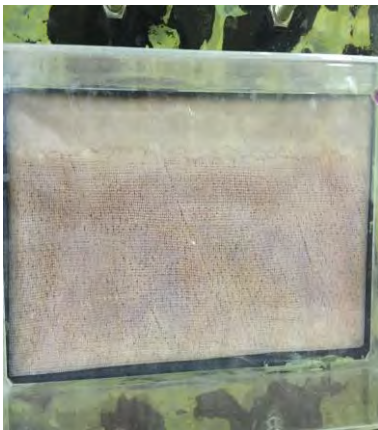
GAMBAR PENELITIAN



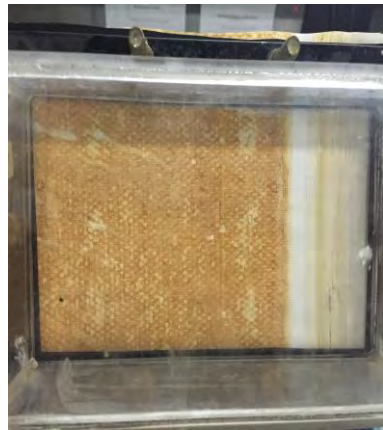
Gambar C.1 *Membrane Cell*



Gambar C.2 *Power supplier*



Gambar C.3 *Membrane Cell*
Katoda



Gambar C.4 *Membrane Cell*
Anoda



Gambar C.5 pH meter



Gambar C.6 Elektroda
Stainless Steel 316



Gambar C.7 Pompa *Feed*
Elektrolisis



Gambar C.8 Random Raschig
Ring untuk *Packed Column*
Absorber

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil studi kelayakan secara teknis maupun ekonomis dalam proses regenerasi NaOH dari garam alkali hasil absorpsi unit *acid gas removal* dengan metode *membrane electrolysis*, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Nilai persen *recovery* natrium naik seiring dengan kenaikan tegangan yang digunakan dalam *membrane electrolysis*. Pada tegangan 5V, 10V, 15V dan 20V menghasilkan persen *recovery* berturut-turut 0,8%; 3,7%; 10,2%; dan 18,5%.
2. Elektroda dengan luas penampang lebih besar memberikan hasil yang lebih baik. Pada tegangan 20V, persen *recovery* pada luas elektroda 18x8 cm sebesar 18,3%, sedangkan luas elektroda 10x8 cm hanya sebesar 9,4%.
3. Semakin tinggi temperatur *feed* yang digunakan, maka persen *recovery* natrium yang didapat juga semakin tinggi. Pada tegangan 20V, temperatur *feed* 50°C menghasilkan persen *recovery* 52,2%, sedangkan pada temperatur *feed* 30°C hanya menghasilkan 18,5%.
4. Penambahan larutan elektrolit KCl dalam jumlah kecil dapat meningkatkan persen *recovery* natrium. Persen *recovery* terbaik yaitu 95% didapatkan dengan menggunakan larutan KCl 0,01M selama 60 menit waktu elektrolisis.
5. Nilai produksi NaOH per energi yang paling tinggi adalah 0,009 M/Wh atau setara dengan Rp 4608,7/kg NaOH, yaitu pada variabel penambahan larutan KCl 0,01M dan waktu elektrolisis 60 menit.

6. Kondisi operasi yang paling baik secara teknis maupun ekonomis adalah tegangan 15V, luas elektroda 18x8cm, temperatur *feed* 30°C, dan disertai penambahan larutan KCl 0,01M dengan waktu elektrolisis 60 menit.

V.2 Saran

1. Mendesain *membrane cell* yang lebih efisien secara kontinyu sehingga dapat diaplikasikan dalam skala industri.
2. Mengkoneksikan *power supply* dengan *real time data tracking* pada PC sehingga perubahan tegangan dan arus bisa tercatat secara detail.
3. Menggunakan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk mengukur kandungan ion natrium dalam larutan NaOH karena hasilnya lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Albo, A; Luis, P; Irabin, A. **2010**. *Carbon Dioxide Capture from Flue Gases Using a Cross-Flow Membrane Contactor and the Ionic Liquid 1-Ethyl-3- methylimidazolium Ethylsulfate*. Industrial & Engineering Chemistry Research 49: 11045–11051.
- Asawa, T. **1989**. *Material Properties of Cation Exchange Membranes for Chloralkali Electrolysis, Water Electrolysis and Fuel Cells*. Journal of Applied Electrochemistry 19: 566–570.
- Atkins, P; Paula J.D. **2006**. *Physical Chemistry Eighth Edition*. New York: W.H. Freeman & Company.
- Bacocchi, R; Carnevale, E; Corti, A; Costa, G; Lombardi, L; Olivieri, T; Zanchi, L; Zingaretti, D. **2012**. *Innovative Process for Biogas Upgrading with CO₂ Storage: Results from Pilot Plant Operation*. Biomass and Bioenergy 53: 128–137.
- Benedetti-Pichler, A.A; Cefola, M; Waldman, B. **1939**. *Warder's Method for the Titration of Carbonates*. Industrial and Engineering Chemistry 11: 6.
- Bockris, J.O; Reddy, A.K.N. **2002**. *Modern Electrochemistry Second Edition*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Bosko, M.L; Rodrigues, M.A.S; Ferreira, J.Z; Mirro, E.E; Bernerdes, A.M. **2014**. *Nitrate Reduction of Brines from Water Desalination Plants by Membrane Electrolysis*. Journal of Membrane Science 451: 276–284.
- Boyce, M.P. **2002**. *Gas Turbine Engineering Handbook 2nd Edition*. Boston: Gulf Professional Publishing.
- Bray, L.A; Ryan, J.L; Wheelwright, E.J. **1986**. *Electrochemical Process for Dissolving Plutonium Dioxide and Leaching Plutonium from Scrap on Wastes*. Pacific Northwest Laboratory PNL-SA-13728.
- Chau, L.H. **1998**. *Biodigester Effluent Versus Manure from Pigs or Cattle as Fertilizer for Production of Cassava Foliage*

- (*Manihot esculenta*). Livestock Research for Rural Development 10: 3.
- Coskun, C; Akyuz, E; Oktay, Z; Dincer, I. **2011**. *Energy Analysis of Hydrogen Production Using Biogas – Based Electricity*. International Journal of Hydrogen Energy 36: 11418–11424.
- Engineering Data Book. **1996**. *GPSA 11th Edition (Electronic) Vol. I & II Section I – 26*. Oklahoma: Gas Processors Association.
- Faverjon, F; Durand, G; Rakib, M. **2006**. *Regeneration of Hydrochloric Acid and Sodium Hydroxide from Purified Sodium Chloride by Membrane Electrolysis Using a Hydrogen Diffusion Anode-membrane Assembly*. Journal of Membrane Science 284: 323–330.
- Fehrenbach, H; Giegrich, J; Reinhardt, G; Sayer ,U; Gretz, M; Lanje, K; Schmitz, J. **2008**. *Criteria for Sustainable Bioenergy Use on a Global Scale*. Federal Environment Agency R+D Project 206 41 112.
- Kermani, M.B; Morshed, A. **2003**. *Carbon Dioxide Corrosion in Oil and Gas Production A Compendium*. Journal of Corrosion Vol. 59: 8.
- Kinigoma, B.S; Osharode, D.I. **2013**. *Optimization of Amine Base Process in the Removal of Carbon Dioxide from Natural Gas for LNG Production*. Journal of Energy Technologies and Policy Vol. 3: 3.
- Liu, H. **2013**. *Ammonia Synthesis Catalyst, Innovation and Practice*. Singapore: World Scientific Publishing. Pte. Ltd.
- Mahmoudkhani, M; Keith, D.W. **2009**. *Low-energy Sodium Hydroxide Recovery for CO₂ Capture from Atmospheric Air—Thermodynamic Analysis*. International Journal of Greenhouse Gas Control 3: 376–384.
- Maile, O.I; Tesfagiorgis H.B; Muzenda, E. **2015**. Factors Influencing Chemical Absorption of CO₂ and H₂S in

- Biogas Purification: A Review. World Congress on Engineering and Computer Science 2015 Vol II.
- Mandal, B; Shirkar, A; De, P; Kuila, S.B. **2016**. *Studies On The Effect Of Electrolyte Concentration On Alkaline Electrolysis And Ion Exchange Membrane Water Splitting For Production Of Hydrogen*. International Journal of Research in Engineering and Technology Vol. 5.
- Moorhouse, J. **2000**. *Modern Chlor-Alkali Technology Volume 8*. London: Society of Chemical Industry.
- McCabe, W.L; Smith J.C; Harriott, P. **1985**. *Unit Operation of Chemical Engineering 4th Edition*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Nagai, N; Takeuchi, M; Nakao, M. **2003**. *Influences of Bubbles between Electrodes onto Efficiency of Alkaline Water Electrolysis* . International Journal of Hydrogen Energy, 28: 35.
- National Energy Council. **2015**. Executive Reference Data National Energy Management. Jakarta: The Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia.
- Nghiem, L.D; Ren, T; Aziz, N; Porter, I; Regmi, G. **2011**. *Treatment of Coal Seam Gas Produced Water for Beneficial Use in Australia: a Review of Best Practices*. Desalination Water Treatment 32: 316–323.
- Nguyen, T; Hilliard, M; Rochelle, G. **2011**. *Volatility of Aqueous Amines in CO₂ Capture*. Energy Procedia 4: 1624–1630.
- Nikolic, V.M; Tasic, G.S; Rakocevic, Z.L; Kaninski, M.P.M. **2007**. Electrocatalytic Activation of Ni Electrode for Hydrogen Production by Electrodeposition of Co and V Species. International Journal of Hydrogen Energy 32: 703–709.
- Oniszk-Popławska, A; Matyka, M; Ryńska, E.D. **2014**. *Evaluation of a Long-Term Potential for the Development of Agricultural Biogas Plants: A Case Study for the Lubelskie Province*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 36: 329–349.

- Rahayaan, B.R.J; Ardhiya; Taufany, F; Susianto. **2015**. *Pengaruh Purifikasi Biogas terhadap Efisiensi Overall Generator Listrik*. Publikasi Ilmiah Online Mahasiswa ITS (POMITS) 2015.
- Ryan, J.L; Bray, L.A; Wheelwright, E.J. **1982**. The Use of Catalyzed Electrolytic Plutonium Oxide Dissolution (CEPOD) for Waste Treatment. Pasific Northwest Laboratory PNL-SA-13729.
- Ryckebosch, E; Drouillon, M; Vervaeren, H. **2011**. *Techniques for Transformation of Biogas to Biomethane*. Biomass and Bioenergy Vol 35: 1633–1645.
- Savari, S; Sachdeva, S; Kumar, A. **2008**. *Electrolysis of Sodium Chloride Using Composite Poly(styrene-co-divinylbenzene) Cation Exchange Membranes*. Journal of Membrane Science 310: 246–261.
- Seadi, T; Rutz, D; Prassl, H; Köttner, M; Finsterwalder, T; Volk, S; Janssen, R. **2008**. *Biogas Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Seghezzo, L. **2004**. *Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater in Subtropical Regions*. Thesis Wageningen University Germany.
- Simon, A; Fujioka, T; Price, W.E; Nghiem, L.D. **2014**. *Sodium Hydroxide Production from Sodium Carbonate and Bicarbonate Solutions Using Membrane Electrolysis: A Feasibility Study*. Separation and Purification Technology 127: 70–76.
- Solera, R; Romero, L.I; Sales, D. **2002**. *The Evolution of Biomass in a Two-phase Anaerobic Treatment Process During Start-up*. Chemical & Biochemical 16: 25–29.
- Stojic, D.L; Marceta, M.P; Sovilj, S.P; Miljanic, S.S. **2003**. *Hydrogen Generation from Water Electrolysis—Possibilities of Energy Saving*. Journal of Power Sources Vol 118: 315-319.
- Sun, Q; Li, H; Yan, J; Liu, L; Yu, Z; Yu, X. **2015**. *Selection of Appropriate Biogas Upgrading Technology - a Review of*

- Biogas Cleaning, Upgrading and Utilisation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 51: 521–532.
- Tippayawong, N; Thanompongchart, P. **2009**. *Biogas Quality Upgrade by Simultaneous Removal of CO₂ and H₂S in a Packed Column Reactor*. Energy 35: 4531–4535.
- Tuarev, D.Y. **2006**. *Use of Membrane Electrolysis for Recovery of Heavy Metal Ions*. Russian Journal of Applied Chemistry Vol. 80: 83–86.
- Udagawa, J; Aguiar, P; Brandon, N.P. **2007**. *Hydrogen Production Through Steam Electrolysis: Model-based Steady State Performance of a Cathode-supported Intermediate Temperature Solid Oxide Electrolysis Cell*. Journal of Power Sources 166: 127–136.
- Wahyuni, S. **2013**. *Panduan Praktis Biogas*. Jakarta: Penebar Swadaya.
- Wang, M; Lawal, A; Stephenson, P; Sidders, J; Ramshaw, C. **2010**. *Post-Combustion CO₂ Capture with Chemical Absorption: A State-of-the-art Review*. Chemical Engineering Research and Design 89: 1609–1624.
- Weiland, P. **2009**. *Biogas Production: Current State and Perspectives*. Application of Microbiology & Biotechnology 85: 849–860.
- Yoo, M; Han, S; Wee, J. **2012**. *Carbon Dioxide Capture Capacity of Sodium Hydroxide Aqueous Solution*. Journal of Environmental Management 114: 512–519.
- Zhao, B; Sun, Y; Yuan, Y; Gao, J; Wang, S; Zhuo, Y; Chen, C. **2011**. *Study on Corrosion in CO₂ Chemical Absorption Process Using Amine Solution*. Energy Procedia 4: 93–100.
- Zoulias, E; Varkaraki, E; Lymberopoulos, N; Christodoulos, N; Karagiorgis G.N. **2002**. *A Review on Water electrolysis*. Pikermi: Centre for Renewable Energy Sources (CRES).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP PENULIS I



Muhammad Romzuddin, penulis lahir di So'e, Nusa Tenggara Timur, 11 Februari 1994. Kini berdomisili di Gresik, Jawa Timur. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya SD Islam Al-Munawarah Kota Pamekasan, SD Muhammadiyah 1 Panji Kota Situbondo, SMP Negeri 1 Manyar Kota Gresik, dan SMA Negeri 1 Manyar Kota Gresik. Penulis aktif dalam kegiatan pengabdian masyarakat pada pengembangan

Biogas sebagai energi terbarukan untuk masyarakat di Pacet Malang. Penulis juga aktif mengikuti seminar dan workshop yang berkaitan dengan masalah energi terutama minyak, dan gas. Penulis berpengalaman kerja praktek di PT Petrokimia Gresik Indonesia pada tahun 2015. Pada akhir studi penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa untuk pengerjaan Tugas Akhir Pra Desain Pabrik dengan judul, **“Purified Biogas Power Plant”** dan skripsi dengan judul, **“Studi Kelayakan Proses Regenerasi NaOH Dalam Unit Acid Gas Removal Yang Menggunakan Membrane Electrolysis”**

Biodata Penulis I

Nama	: Muhammad Romzuddin
TTL	: So'e, 11 Juli 1994
Alamat	: Jl. Kayu 8C No. 6, Gresik
No. HP	: 082247768169
Email	: m.romzuddin@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP PENULIS 2



Alvian Pratama, penulis lahir di Lumajang, 23 Januari 1994. Kini berdomisili di Tuban, Jawa Timur. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya SDN kesamben 1, SMPN 1 Tuban dan SMA Negeri 1 Tuban. Selama menempuh pendidikan S-1 di Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember aktif dalam organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa dan Steering committee kaderisasi mahasiswa Teknik Kimia ITS. Penulis juga aktif

mengikuti seminar dan workshop yang berkaitan dengan masalah energi terutama minyak, dan gas. Penulis berpengalaman kerja praktek di Semen Indonesia pada 2015. Pada akhir studi penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa untuk pengerjaan Tugas Akhir Pra Desain Pabrik dengan judul, **“Purified Biogas Power Plant”** dan skripsi dengan judul, **“Studi Kelayakan Regenerasi NaOH Dalam Unit Acid Gas Removal Yang Menggunakan Metode Membrane Electrolysis”**

Biodata Penulis 2

Nama	: Alvian Pratama
TTL	: Lumajang, 23 Januari 1994
Alamat	: Kesamben , Plumpang Tuban
No.HP	: 082143730551
Email	: gregoriusardhiya@rocketmail.com